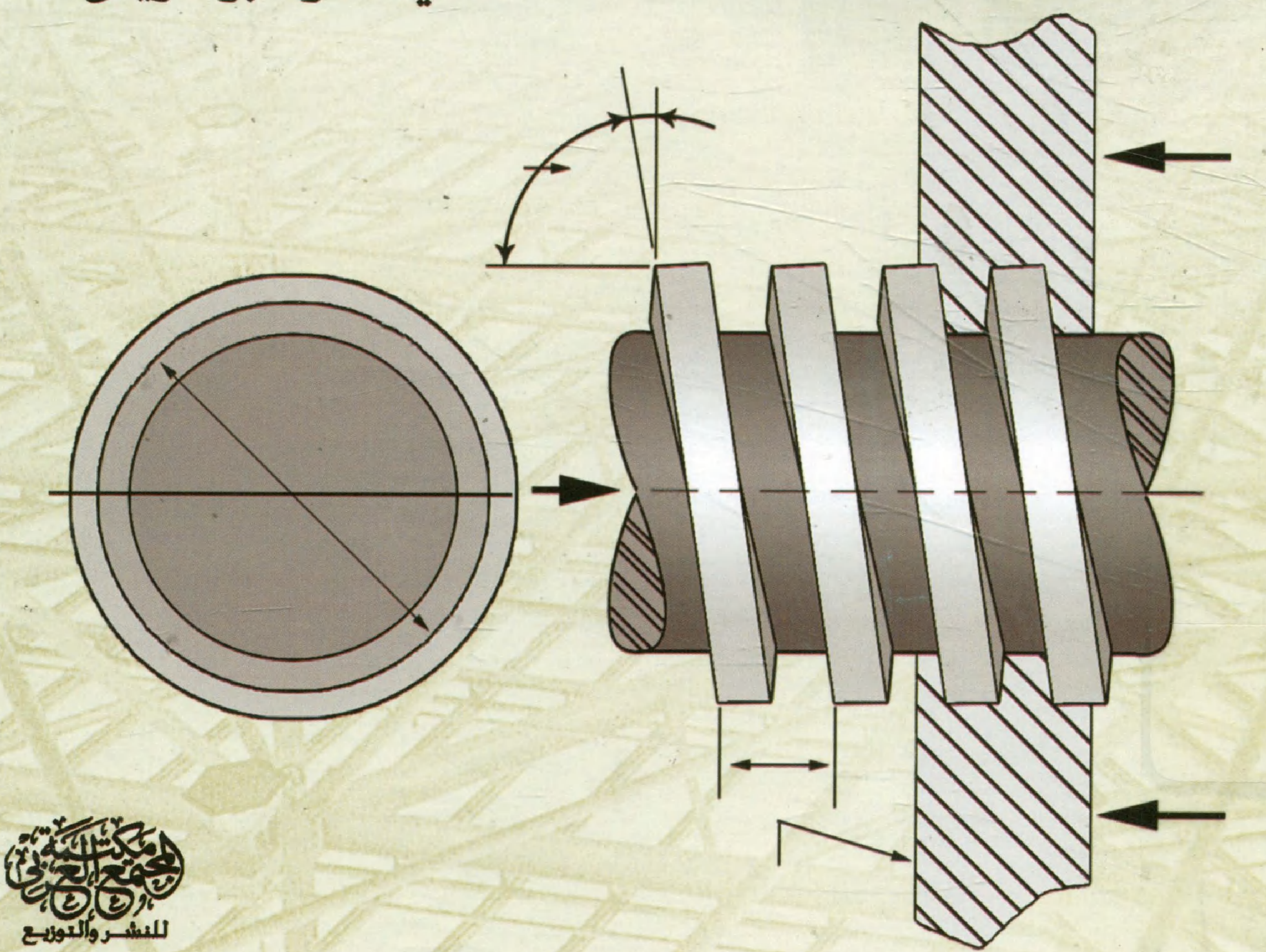
التصميم الميكانيكي

المهندس

شادي محمود أبو سريس



مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع



لتحميل المزيد من الكتب

تفضلوا بزيارة موقعنا

www.books4arab.me

التصميم الميكانيكي

التصميم الميكانيكي

تأليف

المهندس

شادي محمود أبو سريس

الطبعة الأولى

2012م – 1433هـ



رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية(2010/5/1807)

620.1

ابو سريس، شادي محمود

التصميم الميكانيكي/شادي محمود ابو سريس.- عمان: مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع.2010.

(   ) ص

ر.أ. : 2010/5/1807

الواصفات: الميكانيكا الهندسية// التصميم الميكانيكي/

• يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

جميع حقوق الطبع محفوظة

لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو أي جزء منه أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات أو نقله بأي شكل من الأشكال، دون إذن خطي مسبق من الناشر

عمان – الأردن

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means without prior permission in writing of the publisher .

الطبعة العربية الأولى

2012م – 1433هـ



عمان – وسط البلد – ش. السلط – مجمع الفحيص التجاري

تلفاكس 4632739 ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن

عمان – ش. الملكة رانيا العبد الله – مقابل كلية الزراعة –

مجمع زهدي حصوة التجاري

www: muj-arabi-pub.com

Email: Moj_pub@hotmail.com

ISBN 978-9957-525-50-7 (ردمك)

الفهرس

الموضوع	الصفحة

الوحدة الأولى

الإجهاد العمودي وإجهاد القص

الوحدة الثانية

انحراف العوارض (العتبات)

الموضوع	الصفحة

الوحدة الثالثة

نظريات الإنهيار

الوحدة الرابعة

تعب المعادن

الموضوع	الصفحة

الوحدة الخامسة

تصميم التروس

الوحدة السادسة

تصميم البراغي والعزقات

الموضوع | **الصفحة**

الوحدة السابعة

تصميم السيور والسلاسل

المقدمة:

يعتبر التصميم الميكانيكي أساس الصناعة، وهو الخطوة الأولى التي تسبق تنفيذ الماكنات والمعدات على أرض الواقع، حيث يتم وضع الأبعاد الرئيسية والزوايا ويتم اختيار المواد بشكل يعود في النهاية بالتوفير والحصول على منتج آمن يمكن استخدامه بأمان في منظومة ميكانيكية متكاملة.

ولما كانت الحاجة ملّحة إلى وجود قاعدة متينة يستند عليها الطالب في تصميم الأعضاء الميكانيكية المختلفة، أرتأيت إلى وضع ثمرة تعبي وجهدي وحاصل عملي ومعرفتي بين أيديهم كي يكون لهم مرشداً ودليلاً يُعتمد عليه في حياتهم العلمية والعملية، متمنياً لهم النجاح والتوفيق.

والله الموفق،،،

الوحدة الأولى

الإجهاد العمودي وإجهاد القص

الإجهاد العمودي وإجهاد القص

الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية

المقدمة

إن مختلف المنشآت والماكينات التي يتم تصميمها يجب أن تتميز بمقاومتها العالية التي تمكنها من تحمل الأحمال الخارجية التي تتعرض لها دون حدوث انهيار أو كسر أو قبل حدوث تغير ملموس في شكلها وأبعادها وتستخدم قواعد علم التصميم الميكانيكي في التصميم الإنشائي للأجزاء والأعضاء الحاملة لتحديد أنسب الأبعاد والمقاطع التي يمكن استخدامها، وعلم التصميم الميكانيكي يعطي صورة واضحة عن تصرف المنشأة وقدرته على التحميل أثناء مدة الخدمة ومعرفة أسباب انهيار المنشآت.

ويمكن تقسيم المواد الهندسية إلى التالي:

أ. مواد معدنية Metallic Materials وتنقسم إلى:

1) معادن حديدية Ferrous مثل الحديد المطاوع Wrought Iron والصلب steel وحديد الزهر Cast Iron.
2) معادن غير حديدية Nonferrous Metals وتنقسم إلى:

- معادن ثقيلة Heavy Metals: مثل النحاس Copper والنيكل Nickel
- معادن خفيفة Light Metals: مثل الألومنيوم Aluminium والمغنيسيوم Magnisium.
- معادن طرية Soft Metals: مثل الرصاص Lead والقصدير Tin.

ب. **مواد غير معدنية Nonmetallic Materials** وتنقسم إلى:

1) مواد بناء Building Materials مثل الأحجار والركام والإسمنت والجير والجبس والأخشاب والطوب.
2) مواد متنوعة مثل المطاط والفلين والبلاستيك.

ج. **مواد الغرض منها توليد الطاقة مثل المياه والوقود ومواد لتوليد الطاقة الذرية.**

- الخواص الميكانيكية للمواد:
- الخواص الميكانيكية للمواد هي تلك الخواص التي لها علاقة بتأثير الأحمال الخارجية أو القوى المؤثرة على المادة الهندسية، وهذه الخواص يمكن تعريفها كالآتي:

1. الأحمال والإجهادات: Leadsf and Stresses

يتعرض جزء من منشأ أو جزء من ماكينة إلى أحمال أو قوى خارجية تتولد في داخله قوى مقاومة لتلك الأحمال، وتسمى كثافة هذه القوى الداخلية في أي جزء من المنشأ بالإجهاد، والإجهادات إما أن تكون إجهادات شد أو ضغط أو قص، ووحداتها هي M/m^2، ويعطي الشكل() أمثلة لتلك الإجهادات ويعبر عن إجهاد الشد والضغط بالرمز σ وعن إجهاز القصي بالرمز τ ويفترض في حالة الأحمال المركزية P في الشد أو الضغط أن القوى الداخلية عند أي مقطع مستعرض نوزعه توزيعاً منتظماً وعليه تكون كثافة القوى الداخلية(أي الإجهاد) عند أي نقطة هي:

$$\tau = \frac{p}{A}$$

حيث A مساحة المقطع المستعرض.

ويمكن استخدام المعادلة السابقة في بعض حالات القص التي لا يؤثر فيها الحمل P بطريقة مركزية ولكنه يؤثر في اتجاه المستوى المراد حساب الإجهادات عليه فمثلاً في حالة مسمار البرشام في الشكل الآتي يكون القص المؤثر عليه هو:

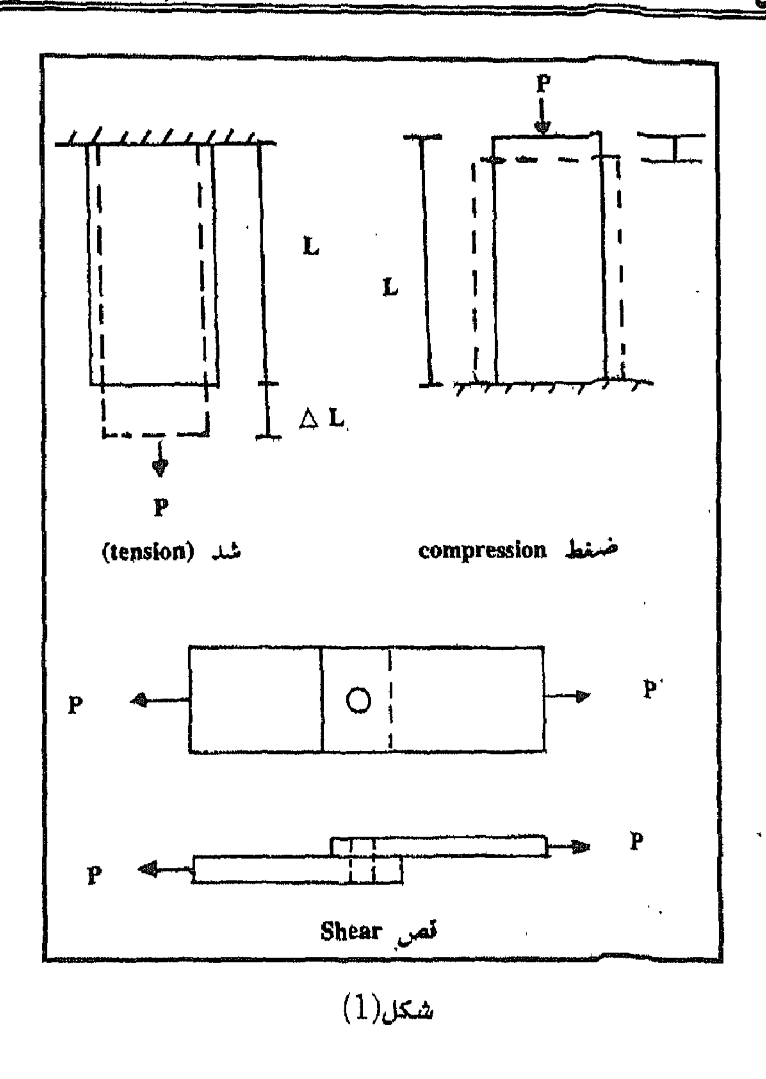
حيث A مساحة المقطع المستعرض لمسمار البرشام.

ويمكن أن تقسم القوى الخارجية إلى قوى استاتيكية أو متكررة أو قوى صدمات، أما القوى الأستاتيكية فهي التي تؤثر ببطء وتظل ثابتة، أما القوى التي تؤثر بعدد كبير من المرات فهي القوى المتكررة أو قوى التعب، أما إذا اثر الحمل بمعدل كبير في سرعته فهو حمل صدم أو حمل ديناميكي.

2. التشكيل والإنفعال: Deformation and Strain

عندما تؤثر قوى خارجية على منشأ أو جزء من ماكينة يتسبب عنها تغير في شكله ويسمى التغير في شكله ويسمى التغير في أي بعد طولي للمنشأ تشكلاً، أما الإنفعال فهو وحده التشكل أو التغير لكل وحدة من الأبعاد الطولية للمنشأ وهذا الإنفعال هون نسبة ولكن يعبر عنه دائماً بالبوصة/بوصة أو سم/سم، ويعبر عن انفعال الشد أو الضغط بالرمز ε فمن الشكل السابق يكون:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



شكل(1)

ويظهر انفعال القص في الشكل(1) ويعبر عنه بالرمز ε_2 فيكون:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta L}{L} = \tan\delta = \delta$$

3. المرونة واللدونة: Elastieity and Plasticity

المرونة هي خاصية الأجسام التي تعطي لها القدرة على الرجوع إلى شكلها وأبعادها الأصلية بعد تشكلها، أما اللدنة فهي تلك الخاصية التي تجعل الجسم محتفظاً بتشكله بعد تأثير الأحمال ورفعها، فاللدونة عكس المرونة، وليست هناك مادة مرنة تماماً أو لدنة تماماً، وبعض المواد مثل المطاط يمكن أن تأخذ تشكلاً كبيراً ولكنه يعود إلى أبعاده الأصلية بعد رفع الحمل المؤثر عليه، وهناك مواد لها مرونة

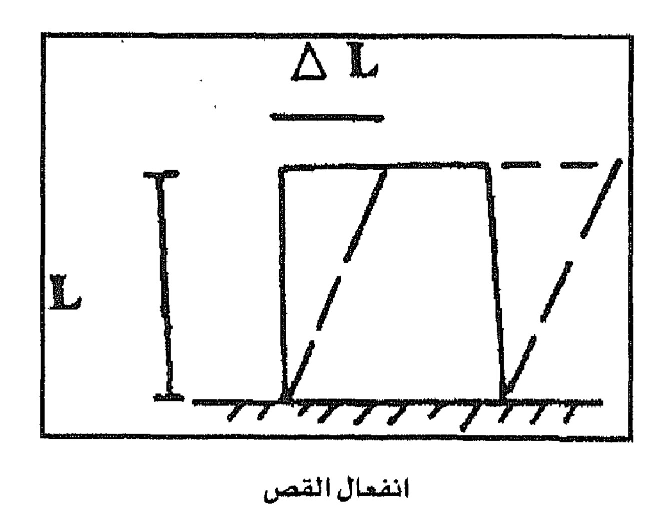
عالية في حدود مدى معين من الإجهادات وبعده تصبح لدنة لدرجة ما ومن أمثلة ذلك الصلب، وهناك بعض المواد الأخرى لها لدونة عالية ولكن قليل من المرونة مثل الرصاص.

4. المطولية والقصافة: Ductility and Brittleness

المواد المطيلة هي تلك المواد التي لها القدرة على عمل تشكل للدن كبير عندما تعرض إلى أحمال شد، والمطلولية خاصية من خواص المعادن ويندر وجودها في غير المعادن، أما القصافة Brittleness فهي عكس المطلولية فالمواد القصفة تتشكل تكشلاً لدناً صغيراً عند تحميلها حتى الكسر وأغلب المواد اليغر معدنية للمنشأةت مواد قصفة.

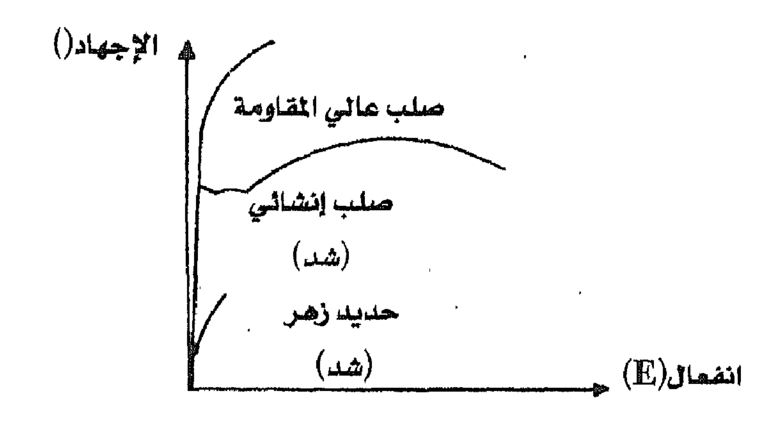
5. منحنى الإجهاد والإنفعال: Stress- Strain Diagram

يعطي منحنى الإجهاد والإنفعال العلاقة بين الإجهاد والإنفعال كما بالشكل(2).



انفعال القص

شكل(2)



منحنى الإجهاد والإنفعال لبعض المواد الهندسية

شكل(3)

يمثل منحنيات الإجهاد والإنفعال لمجموعة من المواد، وتمثل الإجهادات بالإحداثي الرأسي أما الإنفعال فيمثل بالإحداثي الأفقي، ويختلف هذا المنحنى اختلافاً كبيراً تبعاً لنوع المادة وتحميلها، فإذا عرضت أغلب المواد الإنشائية إلى أ ،مال في حدود التشغيل فإنها تتشكل بمعدل ثابت أو تقريباً كذلك أي أن الإجهاد يتناسب مع الإنفعال ويعرف هذا بقانون هوك لتناسب الإجهاد والإنفعال، وهذا صحيح لمواد كثيرة منها الصلب الطري وسبائك الألومنيوم الإنشائي وغير صحيح لدرجة ما للمواد غير المعدنية مثل الطوب والأخشاب والخرسانة.

6. معاير المرونة: Modulus of Elasticity

معاير المرونة هو قيمة الزيادة في الإجهاد مقسوماً على الزيادة المناظرة في الإنفعال لجزء الخط المستقيم الإبتدائي لمنحنى الإجهاد والإنفعال.

ووحداته هي $N/\ m^2$ ويتساوى معاير المرونة في الشد والضغط لأغلب المعادن أما معاير المرونة في القص فهو أقل قيمة من معايري الشد والضغط، ويعبر عن معاير المرونة بقانون هوك وهي:

$$E = \theta \frac{6}{\varepsilon}$$

حيث E هي معاير المرونة في الشد والضغط أما معاير المرونة في القص فهو يسمى معاير الجساءة(G).

7. الصلابة: Stiffness

الصلابة هي الخاصية التي تعبر عن مقاومة التشكل للمواد الصلبة تحت تأثير الأحمال ويكون للمادة صلابة عالية عندما تكون تشكلها في المنطقة المرنة يعبر عنها بمعاير المونة ولكن تتفاوت مقاومتها كبيراً، وتفيد خاصية الصلابة حساب انحراف الكمرات والأعمدة الذي يعتمد انحرافها على المنشأ وشكله ونوع التحميل وصلابة مادته.

8. نسبة بوسون: Poission's Ratio

عندما يَعرض جسم صلب إلى إجهاد فإنه لا يتشكل فقط في اتجاه ذلك الإجهاد ولكنه يتشكل كذلك في اتجاه عمودي على ذلك الإجهاد فمثلاً إذا كان إجهاد شد فإن تلك الأبعاد المستعرضة للجسم تنقص أما إذا كان إجهاد ضغط فإن تلك الأبعاد المستعرضة للجسم تنقص أما إذا كان إجهاد ضغط فإن تلك الأبعاد تزيد، وتكون النسبة بين الإنفعال الجانبي إلى الإنفعال الطولي هي نسبة بوسون وتساوي نسبة بواسن تقريباً للصلب 0.26 والخرسانة0.15 وتفيد هذه الخاصية في الحل الرياضي للأشكال الهندسية المعرضة إلى إجهادات ثنائية المحور أو ثلاثية المحور.

9. المقاومة: Strength

يمكن أن تعرف مقاومة جسم جامد بقدرته على مقاومة الأحمال أو الإجهادات ويعبر عنها دائماً بدلالة الإجهادات، ويجب الإهتمام بمعرفة قدرة المواد على عدم فشلها في مقاومة الأحمال المعرضة لها، ويكون هذا الفشل نتيجة تشكل

كبير أو نتيجة كسر متزايد أو مفاجئ، ويعبر عن المقاومة بطرق كثيرة منها المقاومة المرنة أو المقاومة القصوى أوحد الزحف.

10.الزحف: Gree[

يعبر عن تشكل المادة تحت تأثير الحرارة والزمن والإجهاد الثابت بتشكل الزحف، وهذه خاصية يلزم معرفتها عند تعريض المواد إلى درجات حرارة عالية ولو أن بعض المواد تزحف في درجات الحرارة العادية مثل الرصاص والقصدير.

11.الرجوعية: Resilienc

الرجوعية المرنة للمادة هي كمية الطاقة الممتصة لإجهاد المادة إلى حد مقاومتها المرنة أو هي كمية الطاقة التي يمكن أن تسترجع عند إجهاد المادة إلى حد مقاومتها المرنة ورفع الإجهاد.

12.المتانة: Toughness

13.الصلادة: Hardness

تعني الصلادة بالنسبة للمواد الصلبة مجموعة من الأشياء، فقد تعبر الصلادة عن قدرة المادة على مقاومة الخدش أو القطع أو التأكل بالإحتكاك أو عمل علامة لدنة بها، وتقاس صلادة بعض المواد المعدنية مثل الحجار بحساب مقاومتها للتأكل بالإحتكاك ولكن أغلب الطرق لتحديد صلادة المعادن تعتمد في قياس صلادتها على حساب علاقة كرة من الصلب أو مخروط من الماس.

14.المطروقية: Malleability

المطروقية هي قدرة لامادة على التشكيل بالطرق بدون كسر وهي خاصية مشابهة للممطولية.

15. التعب(الكلال): Fatigue

عندما تتعرض بعض المنشآت أو الماكينات إلى أحمال متكررة ينتج عنها إجهادات متكررة أثناء التشغل وتكون النتيجة حدوث انهيار مفاجئ لها المنشآت أو الماكينات عند إجهاد أقل من الإجهاد الذي يسبب الإنهيار بها لو كانت هذه الإجهادات غير متكررة، وتسمى هذه الظاهرة بتعب المعادن أو كلل المعادن.

الشد الأستاتيكي المحوري والإجهاد العمودي

الشد الأستاتيكي المحوري لعينة يعني شدها بحمل في اتجاه محورها تزداد قيمته بالتدريج من الصفر حتى الكسر ويتم ذلك في اختبار الشد بعد تثبيت العينة من طرفيها في ماكينة الإختبار بواسطة كلابات مناسبة لنوع المعدن والعينة، والعنية قد تكون اسطوانية ذات قطاع دائري أو ذات قطاع مربع أو مستطيل ويعتبر اختبار الشد الأستاتيكي المحوري للمعادن من أهم الإختبارات للتحكم في جودة المواد المعدنية ولإيجاد الخواص الميكانيكية لها، ولذلك تستند معظم المواصفات القياسية إلى اختبار الشد كأساس لبيان خواص المواد المعدنية، وتعتبر المواد الغير معنية مثل الطوب والخرسانة ضعيفة جداً في مقاومة الشد ولكنها تستطيع مقاومة أحمال الضغط لدرجة عالية، ولذلك يعتبر اختبار الضغط للمواد غير المعدنية اختبار قبول أو رفض لها وليس اختبار الشد.

- **سلوك المواد المعدنية تحت تأثير حمل الشد المحوري الأستاتيكي:**

Behavior of Metal Under Static Axial Tension

إذا تعرض قضيب من معدن أسطواني بعد تثبيته من طرفيه في ماكينة الإختبار لحمل شد محوري استاتيكي يتزايد تدريجياً حتى الكسر تحدث استطالة بالقضيب تتزايد بزيادة المل، ولو فرضنا ان مساحة مقطع القضيب عند أي قطاع ثابتة وقيمتها A وأن طول القياس على القضيب L وأن عند أي مرحلة من

التحميل كانت قيمة الحمل P والإستطالة المناظرة لهذا الحمل(ΔL) فإن قيمة الإجهاد σ عند هذا الحمل هي:

$$\sigma = \frac{p}{A}$$

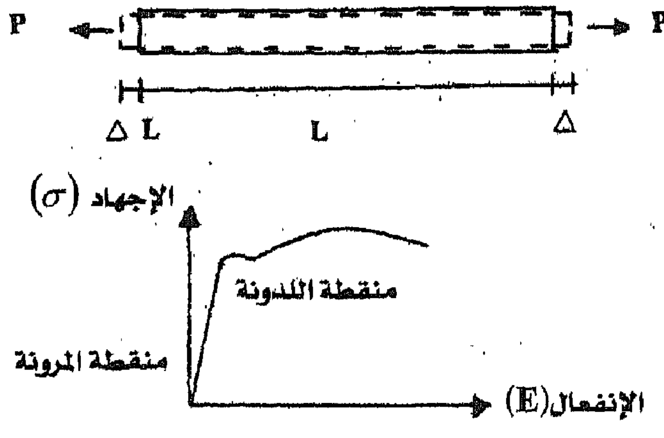
ويكون هذا الإجهاد موزعاً توزيعاً منتظماً قيمة الإنفعال ε هي:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

وتكون العلاقة بين الإجهاد σ والإنفعال ε للمواد المطلية(وهي المواد التي يحدث بها تشكل كبير Deformation قبل حدوث الكسر) والمواد المقصفة(وهي المواد التي يحدث بها تشكل صغير قبل الكسر) والمواد نصف المطلية(وهي المواد التي يحدث بها تشكل متوسط قبل الكسر كما بالأشكال().()() على التوالي.

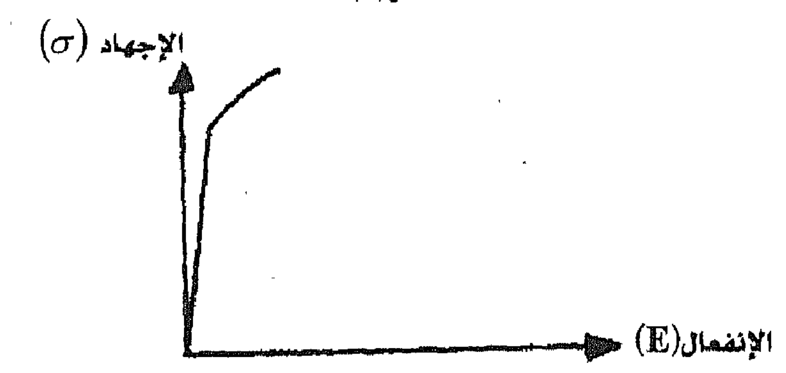
ويجب مراعاة أن ماكينة الإختبار تعطي قيم الشد المحوري P والإستطالة بالقضيب(ΔL) ومن هذه النتائج وبمعرفة أبعاد عينة الإختبار(L, A) يمكن حساب المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال ويكون شكل هذا المنحنى مماثل لشكل المنحنى البياني للحمل والإستطالة والجزء الإبتدائي من هذا المنحنى في حالة المعادن المطيلة والنصف مطيلة عبارة عن خط مستقيم ويتميز بانفعالات صغيرة وعدم بقاء أي استطالة دائمة بعينة الإختبار عند إزالة حمل الشد المحوري، ويسمى هذا الجزء من المنحنى بالمنطقة المرنة.

ويلي هذا الجزء المنطقة اللدنة وهي تتميز بانفعال كبير نسبياً وعند إزالة الحمل عند أي فترة في هذه المنطقة يحدث انفعالاً مرتجعاً قيمته ε e وانفعال لدن ε p كما بالشكل(4)، وتتميز منحنيات الإجهاد والإنفعال للمعادن المطلية بوجود منطقة بداية للجزء اللدن تسمى منطقة الخضوع وفيها تحدث استطالة كبيرة في المعدن بدون أي تغير يذكرة في قيمة الحمل.



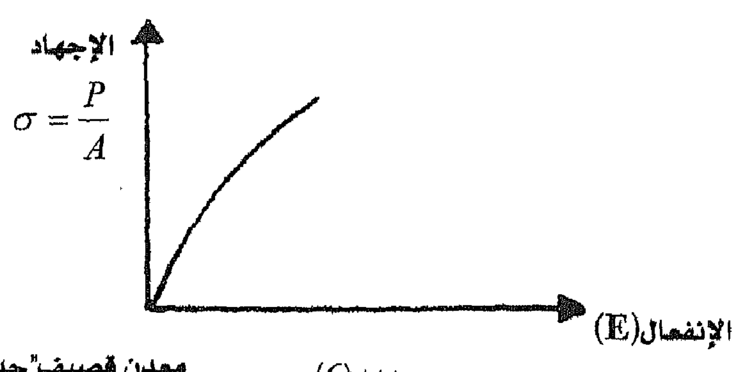
معدن مطبا"صلب طري"

شكل(4)



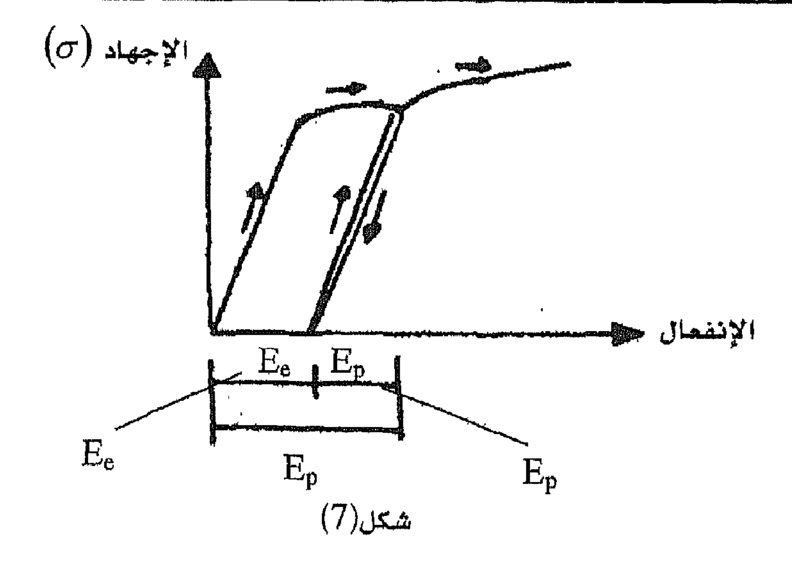
معدن نصف مطيل"صلب على المقاومة"

شكل(5)



معدن قصيف"حديد زهر"

شكل(6)



شكل(7)

أما في حالة المعادن القصفة يكون شكل المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال عبارة عن منحنى من بداية التحميل حتى الكسر ولا يوجد به منطقة مرونة أو منطقة خضوع، ولهذه المعادن استطالة صغيرة عند الكسر بالنسبة للمعادن المطيلة.

أما في حالة المعادن نصف المطيلة يكون شكل المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال عبارة عن خط مستقيم من بداية التحميل حتى إجهاد معين، وهذا الجزء يمثل المنطقة المرنة يليها المنطقة اللدنة، ولهذه المعادن استطالة متوسطة عند الكسر.

أ. المقاومة المرنة:

تكون للمادة مقاومة مرنة عالية إذا كانت لها مقاومة عالية للأحمال بدون خضوع أو تشكل دائم وهي النقطة التي يحدث بها تحول للمادة من المنطقة المرنة(التشكل صغير ومرتجع) إلى المنطقة اللدنة(التشكل كبير ومرتجع جزئياً).

1) إجهاد حد التناسب: Proportional Limit Stress

هو المقاومة المرنة وهو أكبر إجهاد، يكون الإجهاد والإنفعال متناسبان ويحدد بنهاية الخط المستقيم من المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال العادي.

2) إجهاد حد المرونة: Elastic Limit Stress

هو أقصى إجهاد تتحمله المادة مع عدم بقاء انفعال لدن دائم به بعد إزالة الحمل، ويصعب تحديد حد المرونة ويلزم تعيينه عملياً.

3) إجهاد الخضوع: Yield Stress

إجهاد الخضوع هو الإجهاد الذي يحدث عنده زيادة ملحوظة للإنفعال بدون زيادة تذكر في الإجهاد ويوجد بمنطقة الخضوع إجهاد خضوع أقصى وقيمته تتوقف على سرعة التحميل أثناء الإختبار وإجهاد خضوع أدنى وقيمته ثابتة، إجهاد الخضوع الأدنى يؤخذ كمعبر لإجهاد الخضوع ويستعمل ليعبر عن مقاومة المعدن للشد في حدود المرونة، وفي حالة المواد التي ليس لها إجهاد خضوع يحدد لها إجهاد الضمان.

4) إجهاد الضمان: Proof Stress

كثير من المواد توجد لها نقطة خضوع ويستخدم إجهاد الضمان الذي يصل عنده تشكل لدن أو دائم قيمته المحددة وهذا التشكل يؤخذ كنسبة مئوية من الإنفعال ويحدد برسم موازي للجزء المستقيم من منحنى الإجهاد والإنفعال ونقطة التقاطع مع المنحنى تمثل إجهاد الضمان وتعبر عن مقاومة الخضوع، ويجب تحديد النسبة المئوية للإنفعال وهي تتراوح بين 0.1% و0.5٪.

5) الصلابة: Stiffness

هي مقاومة المعدن للتشكل ويكون للمادة صلابة عالية عندما يكون تشكلها بالمنطقة المرنة صغير، وتقاس صلابة المعدن في حالة وجود خط مستقيم بمنحنى الإجهاد والإنفعال يميل هذا الخط في حدود المرونة ويطلق على ميل هذا الخط معاير المرونة.

وفي حالة المواد التي لا يوجد بالمنحنى البياني للإجهاد والإنفعال الخاص بها خط مستقيم تقاس صلابة هذه المواد بإحدى الطرق الآتية:

أ. رسم مماس للمنحنى عند بدايته ثم تعين ميل هذا المماس ويسمى معاير التماس الأولى.

ب. رسم مماس للمنحنى عند الإجهاد المراد معرفة معاير المرونة عنده ثم يعين ميل هذا المماس ويسمى معاير التماس.

ج. بتوصيل النقطة التي على المنحنى التي تمثل الإجهاد المراد إيجاد معاير المرونة عنده بنقطة الأصل ثم تعين ميل هذا الخط ويسمى معاير القاطع.

6) نسبة بوسون: Poisson's Ratio

إذا اتزنت قوة شد محورية P على عينة من المادة لها طول قياسي L وتحدث بها استطالة في اتجاه المحورL ينتج عنها انفعال محوري:

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta l}{l}$$

ونقص في العرض ينتج عنه انفعال جانبي ε_T، فإن النسبة بين الإنفعال الجانبي والإنفعال المحوري تسمى نسبة بواسون.

$$\nu = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$$

7) الرجوعية: Resilience

هي الطاقة التي يمكن للمعدن أن يختزنها عند التحميل ثم يرجعها ثانية بعد إزالة التحميل في حدود المرونة.

الرجوعية = $P . \Delta L = \frac{1}{2} \Delta_e$

حيث p_e حمل حد التناسب.

Δ_e الإستطالة المناظرة لحمل حد التناسب.

وهي المساحة تحت الخط المستقيم من المنحنى البياناي للحمل والإستطالة.

معايير الرجوعية: Modulus of Resolience

هي كمية الطاقة التي يمكن للمعدن أن يختزنها لوحدة الحجوم من المعدن ثم يعيدها ثانية بعد إزالة الحمل.

معاير الرجوعية = $$1/2\sigma_e\varepsilon_e = \int_0^{\varepsilon_e}\sigma d\varepsilon = \int\frac{P.\Delta L}{A.L}$$

حيث

σ_e هي إجهاد حد التناسب.

ε_e هي الإنفعال المناظر إجهاد حد التناسب.

وهي المساحة تحت الخط المستقيم من المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال.

ب. المقاومة اللدنة:

يكون للمادة مقاومة لدنة عالية إذا كانت لها القدرة على مقاومة الأحمال بدون كسر.

1. مقاومة الشد القصوى: Ultimate Tensile Stress

تقاس مقاومة المادة اللدنة في الشد بمقاومتها عند أقصى حمل يمكن أن تتحمله وتعتبر مقاومة الشد القصوى للمادة هي مقاومة الكسر لها بالنسبة للمواد

القصفة والنصف مطيلة أما في حالة المواد المطيلة فإن مقاومة الكسر لها أقل من مقاومة الشد القصوى.

2. الممطولية: Ductility

هي قدرة المعدن على التشكل، وتقاس الممطولية في الشد كالآتي:

أ. النسبة المئوية للإستطالة = $\frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$

إجهاد الخضوع الأقصى

إجهاد حد المرونة

c

b

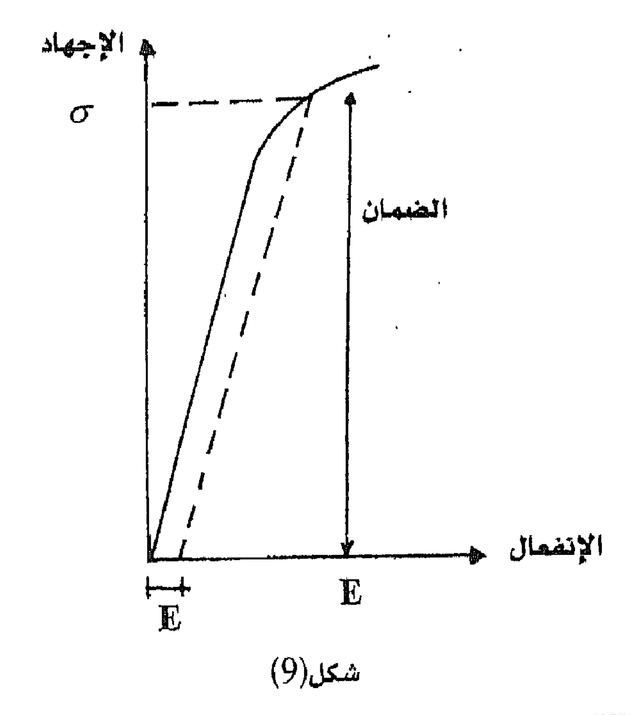
d

a

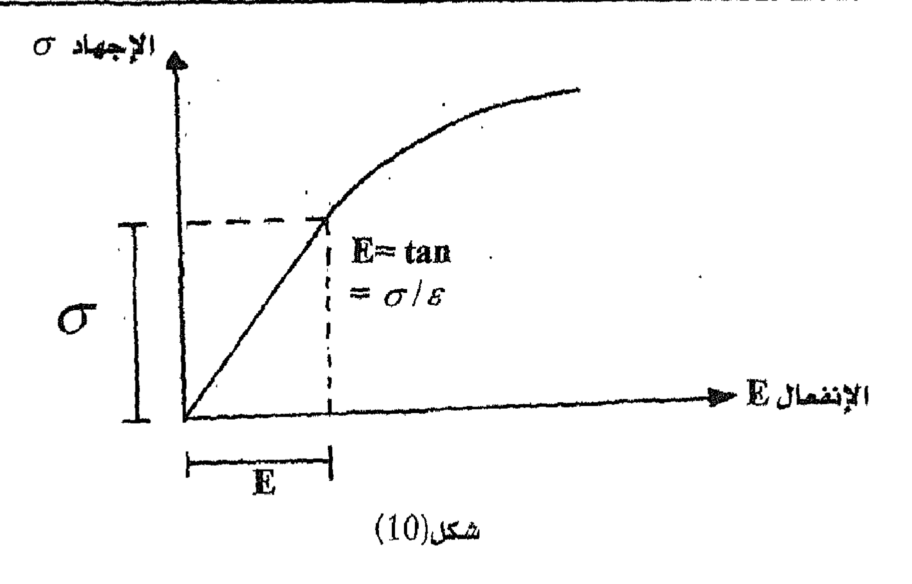
إجهاد الخضوع الأدنى

إجهاد حد التناسب إجهاد

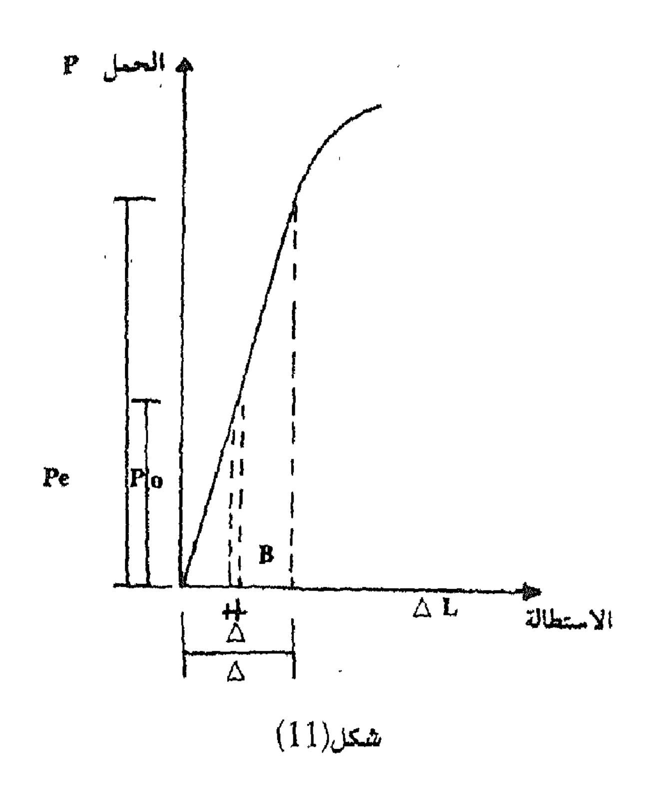
شكل(8)



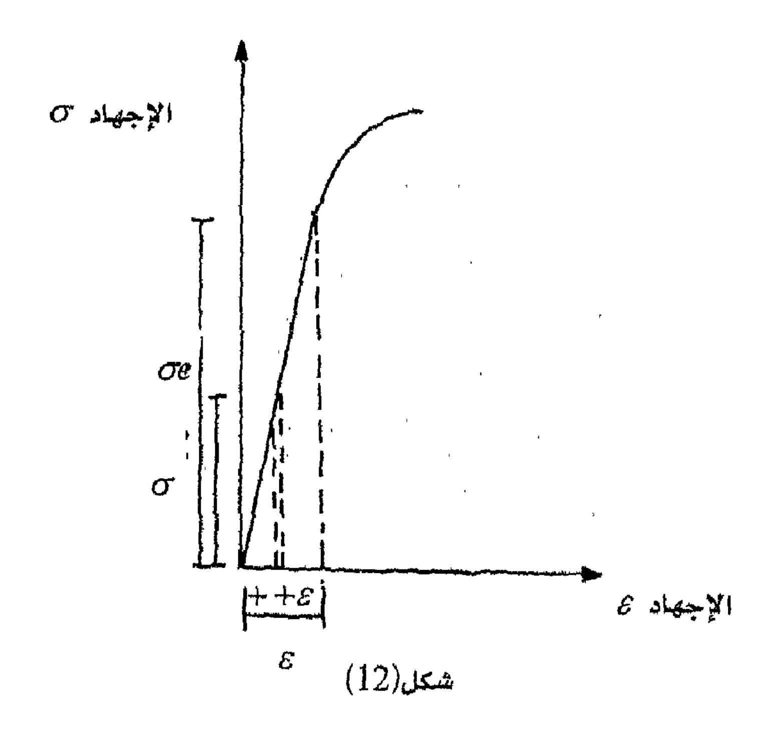
شكل(9)



شكل(10)



شكل(11)



شكل(12)

حيث:

L_o = طول القياس الأصلي للعنية.

L_f=طول القياس بعد كسر العينة.

ب. النسبة المئوية للنقص في مساحة المقطع =

$$\frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

حيث:

A_O ـ المساحة الأصلية لمقطع العينة.

A_f = مساحة مقطع العينة بعد الكسر.

3. المتانة: Tlughness

تكون للمادة متانة عالية إذا كان للمادة قدرة على امتصاص الطاقة في النقطة اللدنة وهي مقدار الطاقة المبذولة في تحميل المعادن حتى الكسر.

المتانة= $\int_0^{\Delta f} p.\Delta$

= المساحة تحت المنحنى البياني للحمل والإستطالة كله.

4. معاير المتانة: Modulus of Toughness

هي مقدار الطاقة الذي تمتصه وحدة الحجوم من المادة لإجهادها حتى الكسر.

معاير المتانة = $\int_0^{\varepsilon_f} \sigma.d\varepsilon$

= المساحة تحت المنحنى البياناي للإجهاد والإنفعال كله.

5. الإستطالة Elongation

عند إجراء اختبار الشد لعينة من معدن مطيل يكون تزيع الإستطالة على نقط طول القياس متساوي تقريباً في البداية ثم يختلف اختلافاً كبيراً من نقطة إلى نقطة عند التحميل بأقصى حمل حيث تزيد قيمة الإستطالة عند منطقة الرقبة وتقل قيمة الإستطالة كلما اتجهنا بعيداً عن منطقة الرقبة، وعند أطراف العينة تكاد تكون الإستطالة موزعة بالتساوي تقريباً ويمكن بيان ذلك بأخذ عينة من المعدن طول قياسها مقسم إلى أقسام متساوية وتحمل تدريجياً حتى الكسر ويحدد القسم الذي حدث به الكسر يوحدد طول القياس بعد الكسر ويحدد طول كل قسم، وترسم العلاقة بين طول القياس وكل من الإسطالة والنسبة المئوية للإستطالة.

6. الإجهاد الحقيقي والإنفعال الحقيقي:

True Stress and True Strain

وفي حالة المواد المطيلة نظراً لأن قيم الإستطالة وبالتالي الإنفعال لقيم الإجهاد في حدود المرونة صغيرة نسبياً عن مثيلتها في حالة الإجهاد فوق حدود المرونة فإن التغيرات في أبعاد العينة(طول القياس ومساحة مقطع العينة لقيم الإجهاد المرن تكون صغيرة أيضاً بالنسبة لهذه التغيرات في حالة الإجهاد اللدن وذلك فإن جزء المنحنى البياني للإجهاد العادي والإنفعال العادي في حدود المرونة للمواد المطيلة لا يختلف كثيراً عن نظيره في منحنى الإجهاد الحقيقي والإنفعال الحقيقي أما جزء المنحنى البياني للإجهاد العادي والإنفعال العدي فوق حد المرونة يختلف كثيراً.

أ. الإجهاد الحقيقي:

هو الحمل المؤثر مقسوماً على مساحة أقل مقطع عند هذا الحمل ومساحة هذا المقطع فوق حدود المرونة أقل كثيراً منها للمقطع الأصلي وهذا النقص في مساحة المقطع يزداد تدريجياً حتى كسر العينة.

الإجهاد الحقيقي = الحمل / مساحة أقل مقطع للعينة عند هذا الحمل

$$\sigma = pi / Ai$$

حيث: pi = الحمل فوق حد المرونة.

Ai= مساحة المقطع عند هذا الحمل.

ب. الإنفعال الحقيقي:

الإنفعال العادي عبارة عن الإستطالة ΔL مقسومة على طول القياس الأصلي L_o، وبينما الإنفعال الحقيقي هو الإستطالة ΔL مقسومة على طول القياس عند هذا الحمل.

فعند زيادة الحمل pi بقيمة ΔPi يزداد طول العينة L_i بقيمة ΔL_i وتكون الزيادة في قيمة الإنفعال نتيجة الزيادة في قيمة الحمل بمقدار ΔP_i هي:

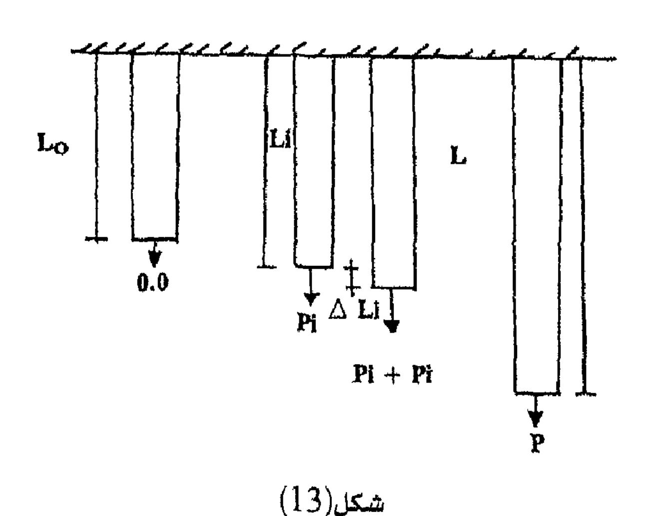
$$\frac{\Delta L_i}{L_i}$$

وبذلك يكون الإنفعال الحقيقي عند أي حمل:

$$True \quad strain \quad = \int_{L_o}^{L} \frac{\Delta L_i}{L_i} \quad Log_e \frac{L}{L_o}$$

ونظراً لأن حجم العينة ثابت عند أي حمل:

$$L_0 A_0 = L\ A$$



شكل(13)

إجهادات القص الناتجة عن أحمال الشد:

في حالة تعرض عضو لحمل شد مركزي في اتجاه محوره قدره P وعند أي مستوى يميل على محور العضو بزاوية مقدارها $p \cos\theta$ ومساحة السطح المائل $A/\cos\theta$ حيث A مساحة مقطع المنشور فإن القوة الموازية للسطح المائل تسبب إجهاد قصي

$$\tau_o = \frac{p\sin\theta}{A/\cos\theta}\sigma\sin\theta \quad \cos\theta\frac{\sigma\sin 2\theta}{2}$$

والإجهاد العمودي σ_0

$$\sigma_o = \frac{p\cos\theta}{A/\cos\theta} = \sigma\cos^2\theta$$

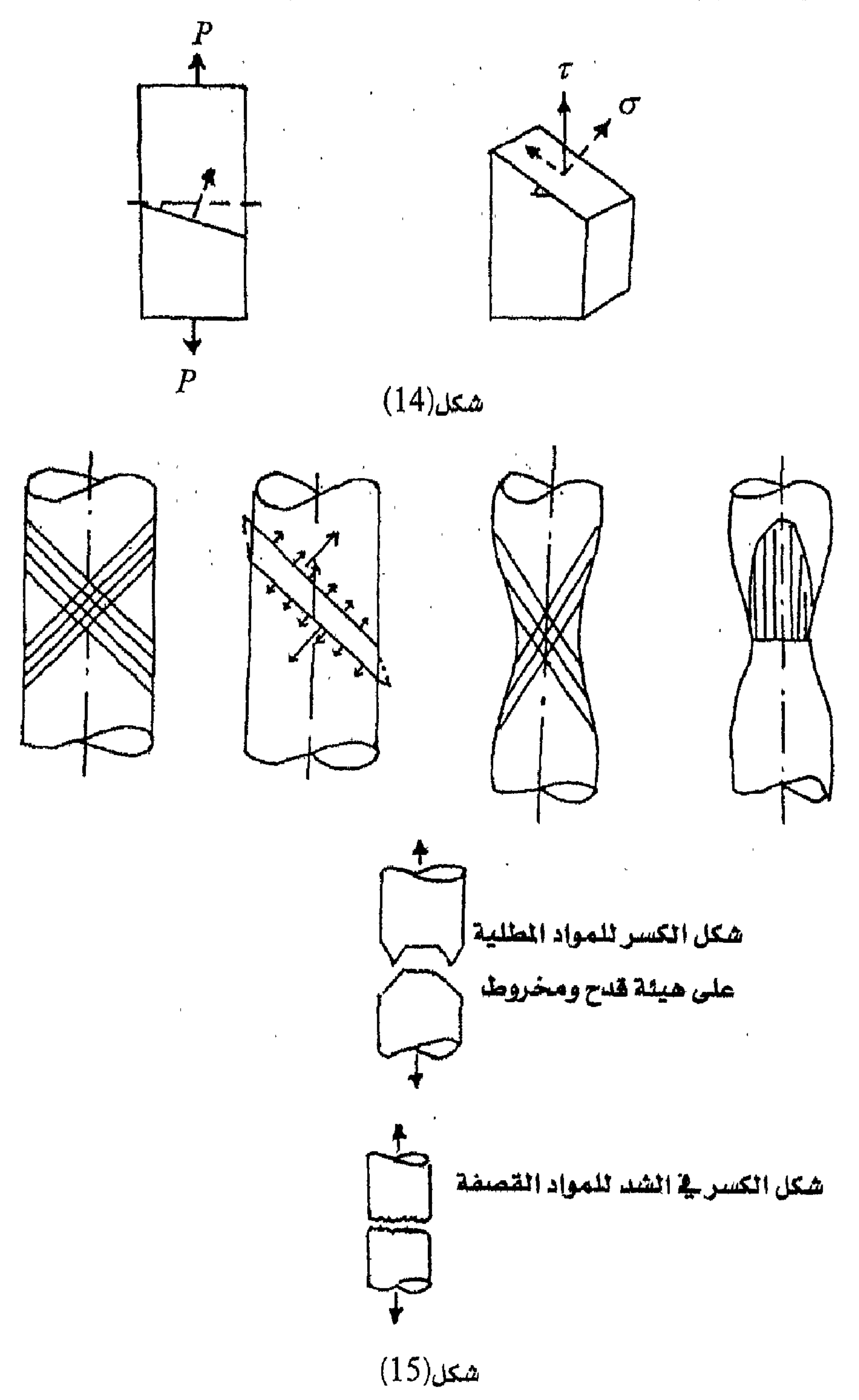
وأقصى إجهاد يكون عند مستوى يميل بزاوية 45° على الأفقي.

شكل الكسر في الشد:

أ. المواد المطيلة:

عندما يصل الحمل إلى الخضوع يتسبب في انسياب المادة على إجزاء لم تصبح المادة في حالة خضوع إلى أن تصل إلى أقصى حمل وتكون الرقبة في العينة ويزداد طول العينة ويتناقص القطر بالتدرج حتى الإنهيار ويحدث الكسر على هيئة قدح ومخروطج ويمكن تفسير ظاهرة حدوث الرقبة بانزلاق جزئيات المعدن على المتسويات المعرضة إلى أكثر قوة قص(مستوييات تعمل 450 من الراسي) ويحدث بسبب ذلك الإنزلاق تحميل شد غير محوري ولكن يحدث اتزان للعينة لا بد من حدوث دوران لهذه المستويات ويتسبب من هذا الدوران نقص في مساحة المقطع المستعرض للعينة يصحبه زيادة كبيرة في استطالتها ويحدث الإنهيار.

بعد حدوث رقبة تجعل توزيع الإجهاد غير منتظم على مقطع العينة عند الرقبة ويحدث الإنهيار في منطقة وسط العينة بالإنفعال الناتج من الشد يصاحبه استمرار انزلاق جزئيات معدن العينة عند منطقة الحروف.



شكل(14)

شكل(15)

ثم يستمر الإنزلاق لجزئيات المعدن في منطقة لا حروف للمقطع المستعرض عند الرقبة مما يؤدي إلى الإنهيار والكسر على مستوى يميل 45° مع الأفقي وهو المستوى الذي يؤثر عليه أقصى قص ويكون الإنهيار على هيئة قدح ومخروط.

ب. المواد النصف مطيلة:

في هذه الحالة يحدث الإنهيار على شكل قدح ومخروط أيضاً ولكن برقبة أقل مما هو في المواد المطيلة.

ج. المواد القصفة:

وفي هذه الحالة يكون الكسر على مستوى عمودي على اتجاه قوة الشد نتيجة الإنفصال نظراً لضعف المواد القصفة في الشد عنها في تحمل إجهادات القص.

العوامل المؤثرة على خواص شد المعادن:

العوامل الأتية تؤثر على الخواص الميكانيكية للمعدن في الشد وبالتالي تؤدي إلى بعض التعديلات في المنحنى البياني للإجهاد والإنفعال.

1) نسبة الكربون:

يعتبر الكربون العنصر الأساسي في الصلب ويحدد المقاومة والصلادة والمطولية في الصلب وإضافة الكربون وزيادة نسبته يزيد من مقاومة وصلادة الصلب الطري ويقلل من المطولية والمتانة.

2) تأثير المعالجة الحرارية:

أ. التخمير(التلدين): Annealing

التخمير هو معالجة المعدن بالتسخين حتى درجة حرارة $870C^{o}-760C^{o}$ لمدة كافية لإزالة أي انفعالات داخلية ناتجة من التشغيل على البارد ثم التبريد ببطء والتخمير يحسن مقاومة الشد وإجهاد الخضوع قليلاً وكذلك المطولية والمتانة.

ب. التصلد: Annealing

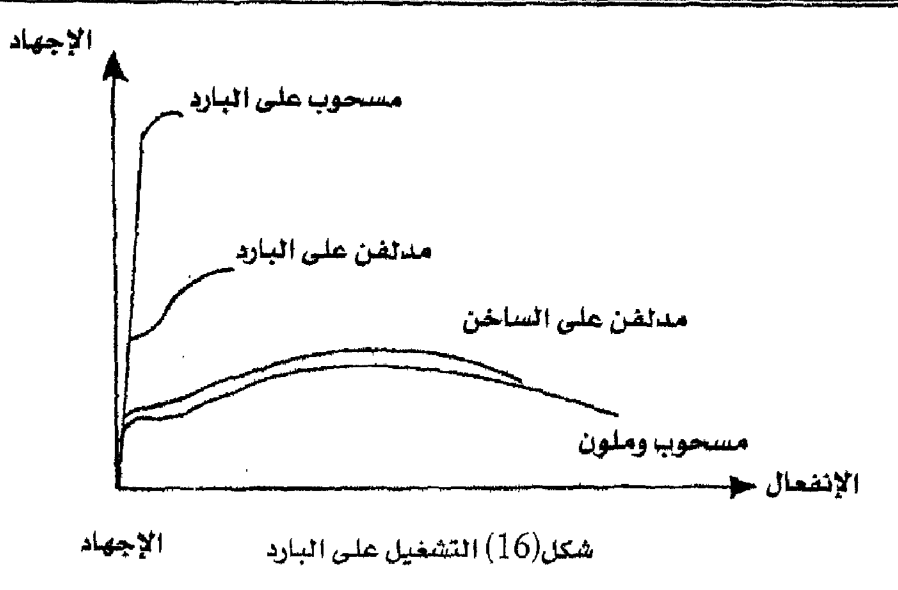
يتم تسخين المعدن مثل عملية التخمير ثم التبريد السريع مباشرة في محلول ويكون الصلب المقسى قضف والتقسية تزيد من مقاومة الشد كثيراً ولكنها تقلل من المطولية.

ج. التطبيع: Tempering

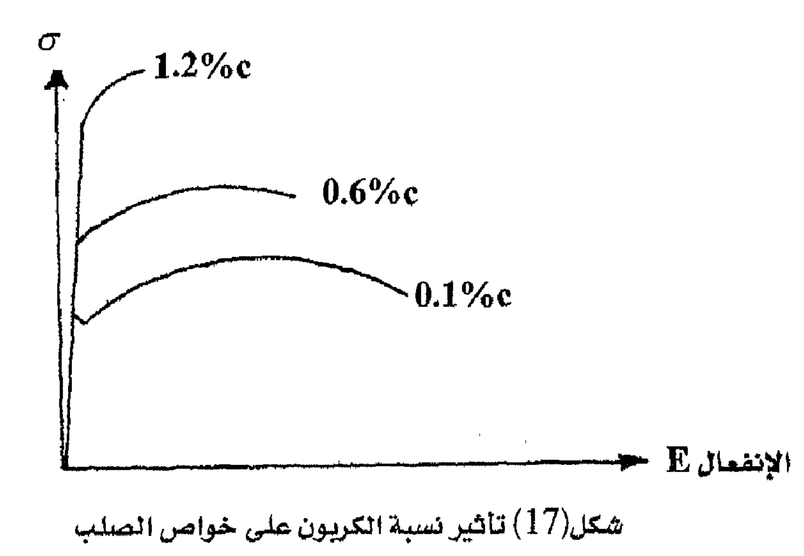
أن الصلب المصلد بالتقسيمة يكون قصف جداً بعد عملية التقسية ولتحسين هذه الحالة يطبع الصلب بواسطة عملية التطبيع وذلك بالتسخين لدرجة من $200-540$ °c ثم يلي ذلك التبريد البطيئ أو السريع، والتطبيع يزيد مقاومة الشد كثيراً كما يحسن ممطولية المعدن ومتانته.

3) التشغيل:

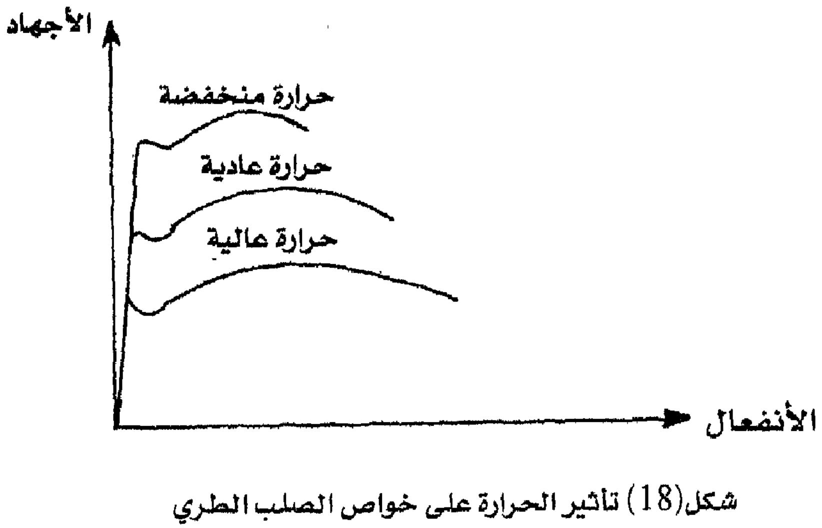
يتم تحميل المعدن فوق حد المرونة ثم إعادة تحميله عدة مرات، وينتج عن ذلك تحسين إجهاد الخضوع وإجهاد حد التناسب وأقصى مقاومة في الشد وخاصية الرجوعية كما ينتج عنه نقص في المطولية والمتانة، ويمكن تقسيم التشغيل الميكانيك للمعجدن إلة نوعين أثناء صب المعدن والآخر أثناء صناعته بعمليات الدلفنة والسحب والطرق على الساخن أو البارد، حيث تزيد العمليات المقاومة والصلادة وتنقص من المطلولية.



الإجهاد شكل(16) التشغيل على البارد



شكل(17) تاثير نسبة الكربون على خواص الصلب



شكل(18) تاثير الحرارة على خواص الصلب الطري

4) سرعة التحميل اثناء الإختبار: Speed of testing

كلما زادت سرعة التحميل أثناء إجراء الإختبار تزداد مقاومة الشد وإجهاد الخضوع وتقل المطلولية للمعادن، ولا تتأثر المعادن القصفة بهذه السرعة.

5) الحرارة: Temperature

إذا ارتفعت درجة حرارة المعادن بصفة عامة لأكثر من 250c تقل مقاومة الشد وإجهاد الخضوع وتزداد المطولية.

- القص الأستاتيكي: Static Shear

إجهاد القص هو ذلك الإجهاد الذي يؤثر في إتجاه موازٍ لمستوى الجسم ويحدث القص من تأثير قوى الشد أو الضغط كما في حال الوصلات المبينة بالشكل(19) وتسمى بالقص المباشر، وقد يحدث القص نتيجة عزم الإنحناء كما في الشكل(20) ويحدث عزم الإلتواء بالمقطع المتسعرض إجهادات قص وفي حالة المقطع الدائري يترعض القطاع إلى قص خالص نتيجة عزم الإلتواء كما في الشكل(21).

أولاً: القص المباشر:

يحدث القص المباشر الخالص من تأثير قوتين متوازيتين متضادتين المسافة بينهما صغيرة ويندر حدوث القص الخالص من قوى الشد حيث أنّ هذه الوقى تسبب وجود عزم إنحناء صغير ولكن يمكن إهماله.

وينقسم القص المباشر إلى:

أ. قص مباشر مفرد: Single Shear

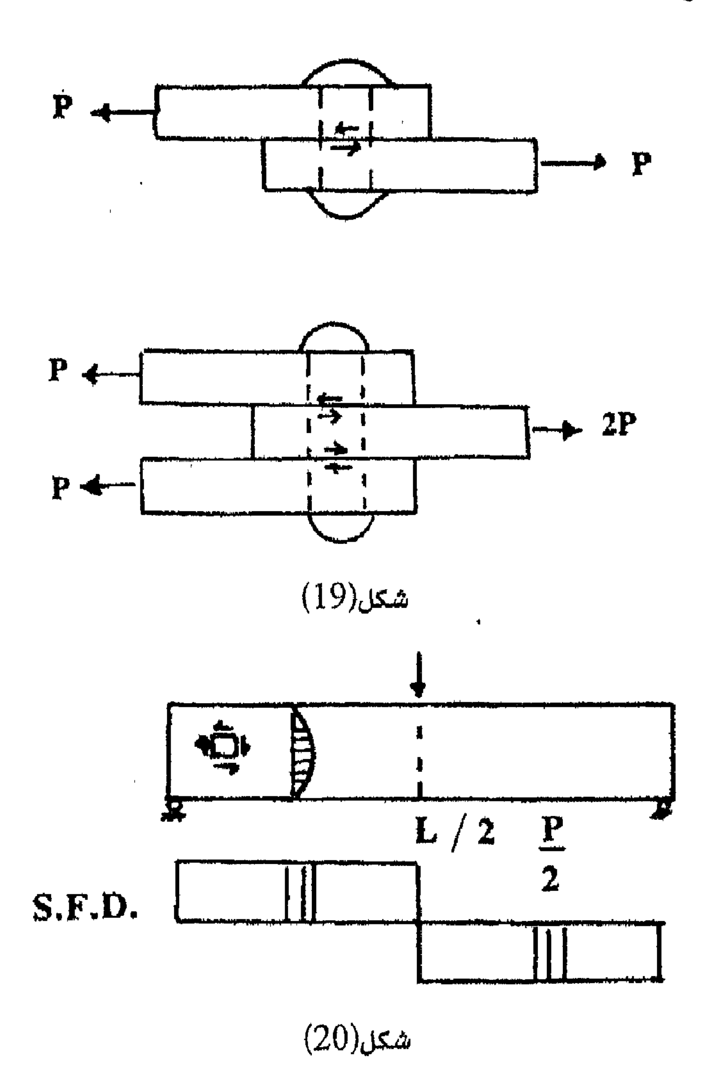
حيث يقاوم تأثير القص مقطع واحد مستعرض من الجسم.

حيث:

τ = إجهاد القص المفرد. Single Shear Stress

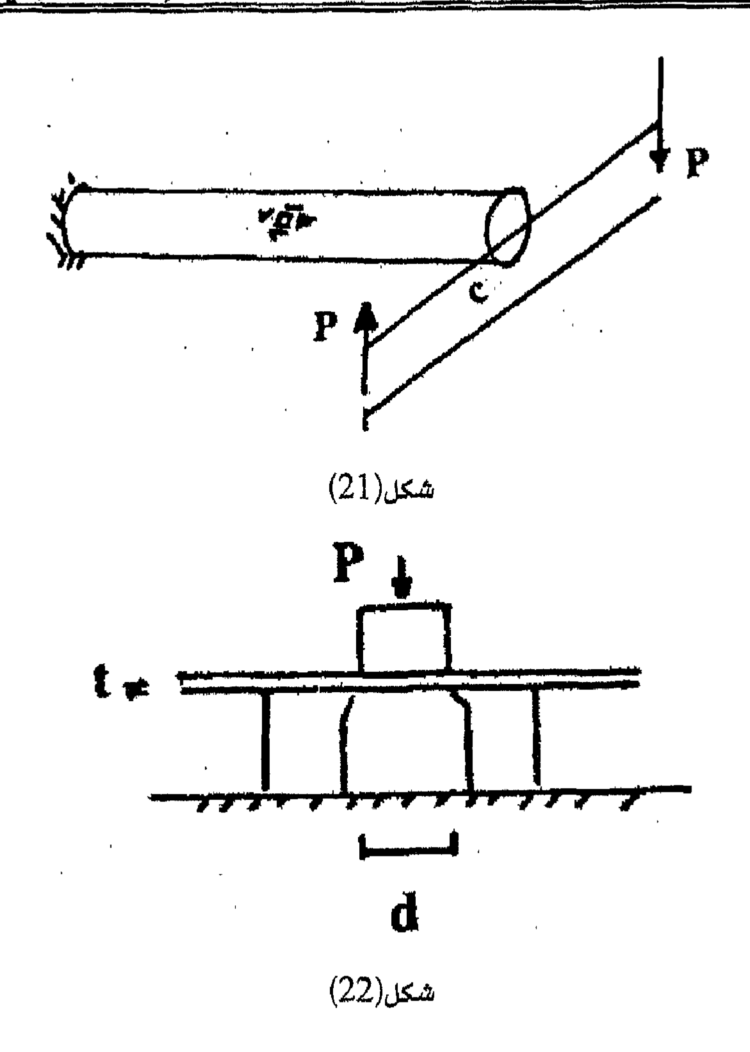
A= مساحة مقطع الجسم.

P= حمل الكسر.



شكل(19)

شكل(20)



شكل(21)

شكل(22)

ب. قص مزدوج: Double Shear

حيث يقاوم تأثير القص مقطعتين مستعرضين من الجسم.

$$\tau = \frac{p}{2A}$$

ج. القص الثاقب: Punching Shear

يتعرض الجسم للقص عند أحداث ثقب به بواسطة قوى ضغط كما بالشكل(4).

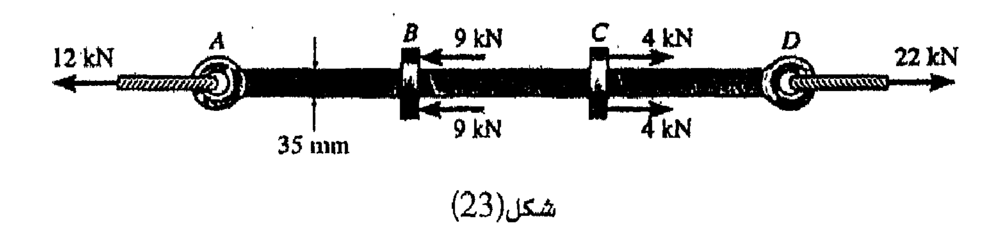
إجهاد القص الثاقب=

$$\tau_p = \frac{p}{\pi dt}$$

حيث d، t، p كما هي موضحة في الشكل(23).

أمثلة محلولة:

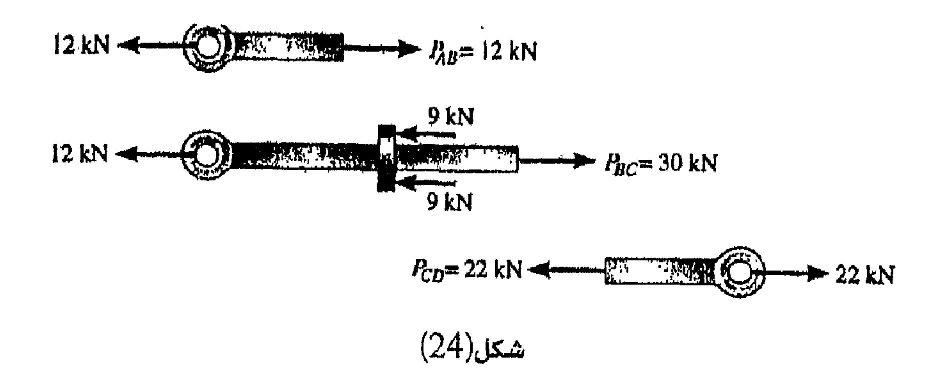
1) للعمود في الشكل التالي عرض ثابت قدره 35mm وسماكة مقدارها 10mm، أوجد الإجهاد العمودي الأقصى في العمود عند تعرضه للقوى الموضحة.



شكل(23)

الحل:

يجب أن تكون القوى الداخلية في جميع المناطق متساوية نظراً لأنّ العمود في حالة إتزان، لذا عند أخذ مقطع في كل قاطع ينتج أنّ:



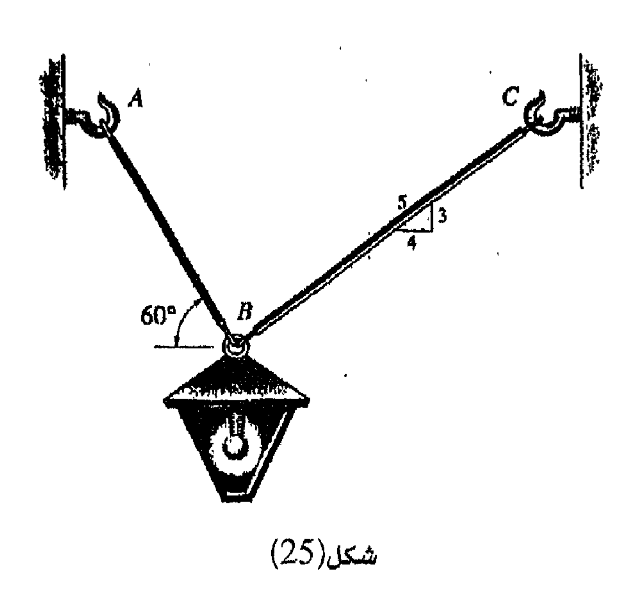
شكل(24)

ويتضح من الشكل أنّ أقصى قوة داخلية محورية تولد في القطاع Bc لذا فإنّ $P_{BC} = 30\ kN$

وعليه يحسب الإجهاد الأقصى كما يلي:

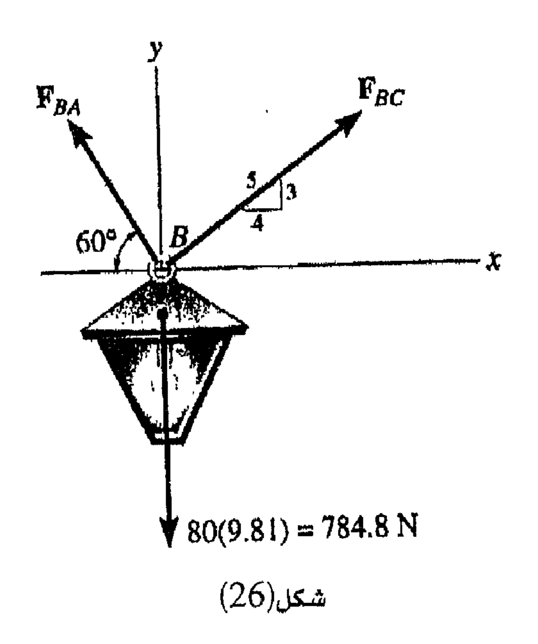
$$\sigma_{BC} = \frac{P_{BC}}{A} = \frac{30 \times 10^3}{(0.035)(0.01)} = 85.7MPa$$

2) تمّ تدعيم مصباح كهربائي تحلته 80kg بقضيبين AB وBC كما في الشكل، إذا كان قطر القضيب AB هو 10mm وBC هو 8mm، أوجد الإجهاد المتولّد في كل قضيب.



شكل(25)

الحل: يجب إيجاد القوى الداخلية في كل قضيب وذلك من خلال رسم مخطط الجسم الحر للمصباح وتوضيح القوى المؤثرة عليه كما هو موضح في الشكل(26).



شكل(26)

$F_{BC}(4/5) - F_{BA}\cos 60 = o$ $\qquad \sum F_x = o$

$F_{BC}(3/5) + F_{BA}\sin 60 - 784.8 = o$ $\qquad \sum F_y = o$

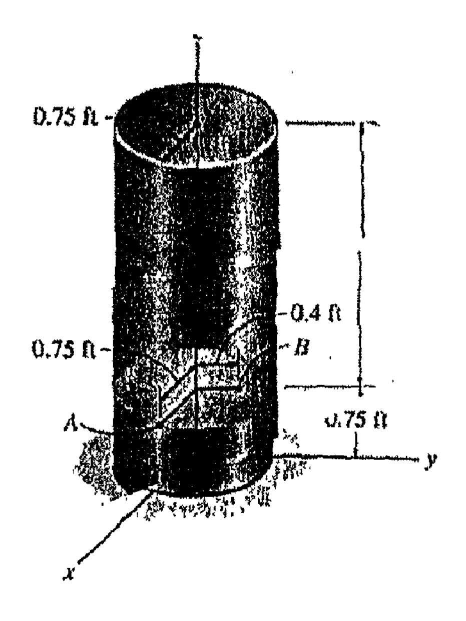
$F_{BC} = 395.2N, F_{BA} = 632.4N$

وعليه يمكن تحديد الإجهاد المتولّد في كل قضيب كما يلي:

$$\sigma_{BC} = \frac{F_{BC}}{A_{BC}} = \frac{395.2}{\pi(0.004)^2} = 7.86\ MPa$$

$$\sigma_{BA} = \frac{F_{BA}}{A_{BA}} = \frac{632.4}{\pi(0.005)^2} = 8.05\ MPa$$

3) اسطوانة مصنوعة من الفولاذ الوزن النوعي له $\delta_{st} = 490\ 1\ b/ft^3$ أوجد الإجهاد الإنضغاطي المؤثر على النقطة A والنقطة B.



شكل(27)

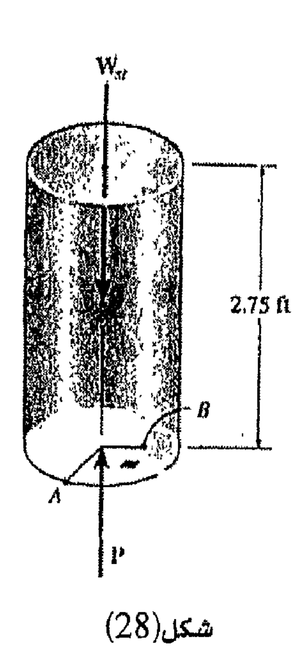
الحل:

لإيجاد القوى الداخلية عند مقطع يمر من النقطة A والنقطة B يجب رسم مخطط الجسم الحر وإيجاد قيمة الوزن المؤثر بالإتجاه السفلي كما يلي:

$W_{st} = \gamma_{st} V_{st}$

$=(490))\times 2.75)\times \ \pi)\times 0.75)^2$

$= 2381$ Lb



شكل(28)

ولإيجاد القوة الداخلية p عند مقطع A وB تستخدم معادلة الإتزان على محور Z كما يلي:

$P- Wst= o \qquad \sum F_{z=} o$

$p- 2381 = O$

$p= 238$ Lb

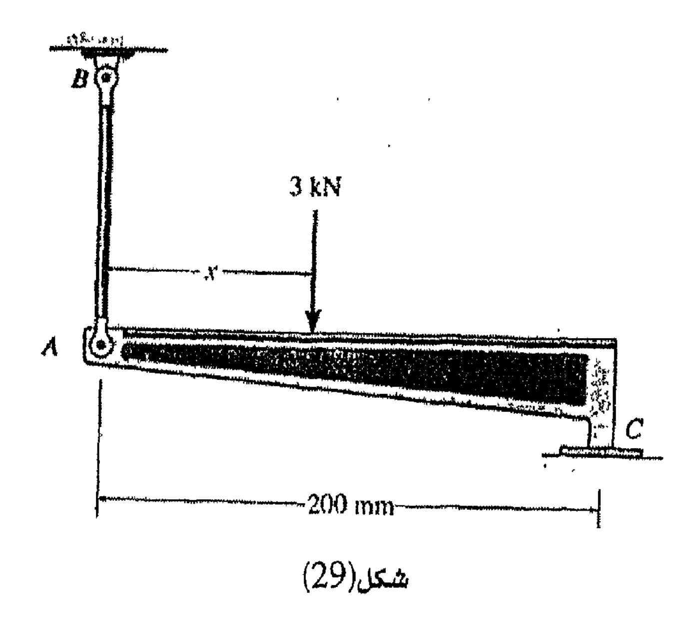
وعليه يمكن تحديد الإجهاد الإنضغاطي عند النقطة A والنقطة B كما يلي:

$$\sigma = \frac{p}{A} = \frac{2381}{\pi(0.75)^2} = 1374.5 Lb/ft^2$$

$$= 1347.5/144 = 9.36 \quad Psi$$

ملاحظة: إنّ الإجهاد على النقطة A وB هو نفس الإجهاد وذلك لأنّ القوة تؤثر على مقطع المساحة كاملاً وتولّد نفس الإجهاد على جميع نقاط السطح.

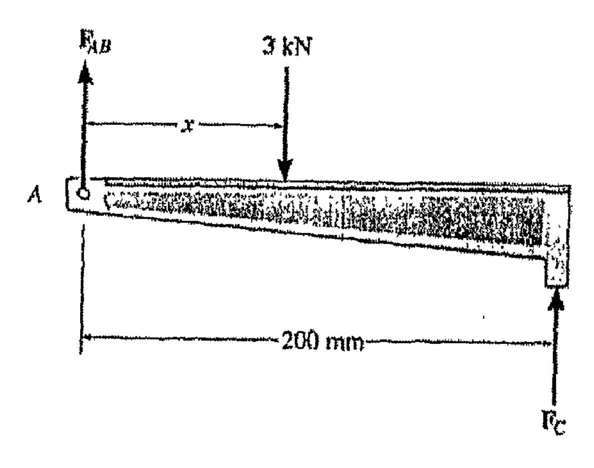
يتعرض العضو AC في الشكل(29) لقوة عمودية مقدارها 3 KN حدّد موقع القوة(x) وذلك حتى يتساوى الإجهاد الإنضغاطي عند c مع الإجهاد الشّدي عند A، إذا علمت أنّ مقطع المساحة عند A هو $400mm^2$ ومقطع المساحة عند C هو $650mm^2$.



شكل(29)

الحل:

من رسم مخطط الجسم الحر يمكن إيجاد علاقة بين القوى الداخلية F_{AB} و F_C وموقع القوة (X) كما في الشكل (30).



شكل (31)

$F_{AB} + F_C - 300 = O$ ....(1) $\sum Fy = O$

$3000(X) + FC(0.2) = O$ $\sum_{MA} = -$

وبما أنّ الإجهاد عند النقطة A و B مستاوي:

$$\frac{F_C}{650\times10^{-6}} = \sigma = \frac{F_{AB}}{400\times10^{-6}}$$

$$F_C = 10625 \quad F_{AB} \text{.................................}(3)$$

نعوّض (3) في φ:

$10625FAB + FAB = 3000$

$F_{AB} = 1143\ N$

$F_C = 1857N$

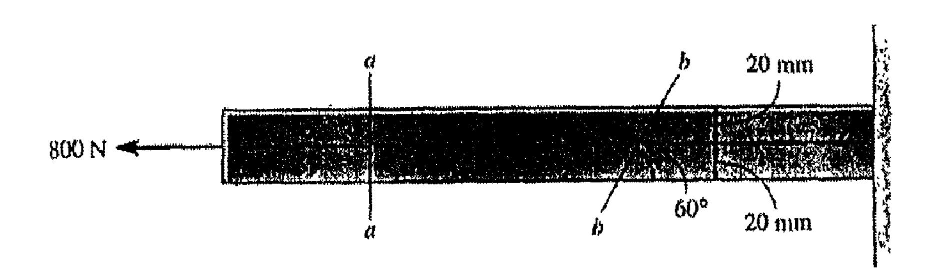
ومنه يمكن تحديد قيمة(X) من المعادلة(3):

$$-3000(X) + 1857(0.2) = 0$$

$$X= 0.124m$$

$$X= 124mm$$

4) قضيب له مقطع مربع بحيث أنّ العرض والسمك يساوي 40mm، إذا أثرت عليه قوة محورية مقدارها 800N، حدّد الإجهاد العمودي والإجهاد القصي المؤثر على (a) المقطع a-a (b) المقطع b-b.



شكل(32)

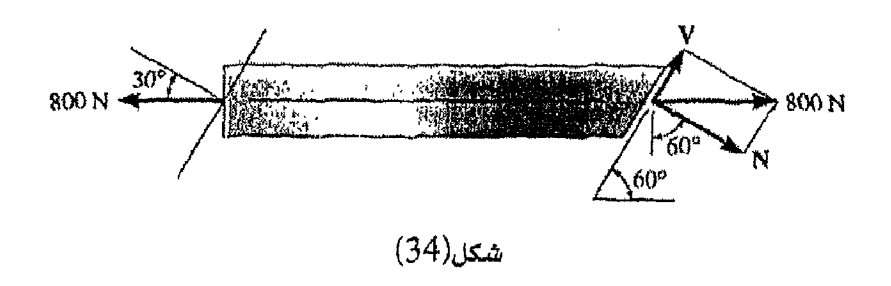
الحل: عند أخذ مقطع عند a-a تكون القوة الداخلية كما يلي:

شكل(33)

وبالتالي فإنّ للإجهاد العمودي هو:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{800}{(0.04)(0.04)}$$

أمّا عند أخذ المقطع عند b-b فتظهر قوة عمودية على مقطع المساحة N وقوة موازية للسطح V كما في الشكل(34).



شكل(34)

N= 800Cos 30 = 692.8N

V= 800 Sin 30 = 400 N

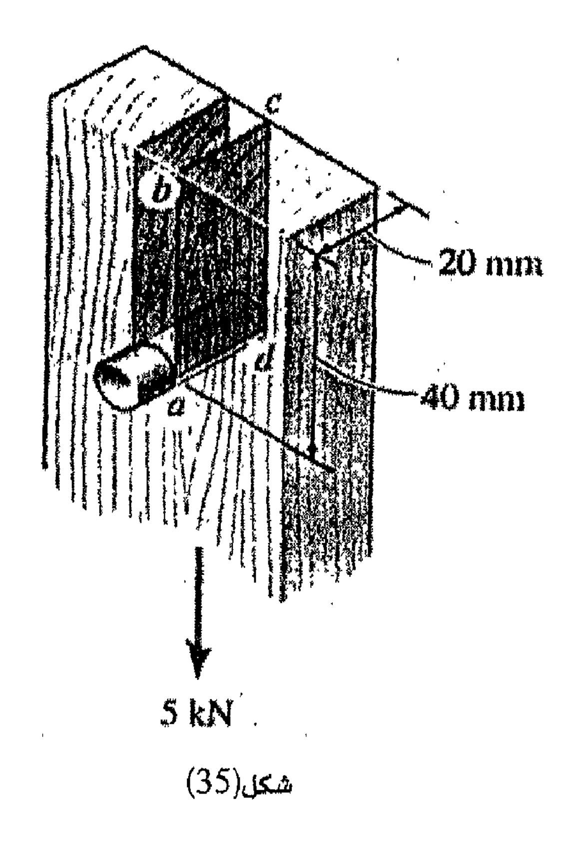
وبالتالي يمكن إيجاد الإجهاد العمودي كما يلي:

$$\sigma = \frac{N}{A/Sin60} = \frac{69208Sin60}{(0.04)(0.04)} = 375kP\sigma$$

أمّا الإجهاد القصي فيكون:

$$\tau = \frac{N}{A/Sin60} = \frac{400Sin60}{(0.04)(0.04)} = 217kp\sigma$$

5) قطعة خشبية متدلية من عمود فولذي قطره 10mm، المثبت في جدار، إذا تعرضت هذه القطعة لقوة مقدارها 5KN، احسب إجهاد القص المتولّد في العمود والمناطق المظللة في الشكل التالي.



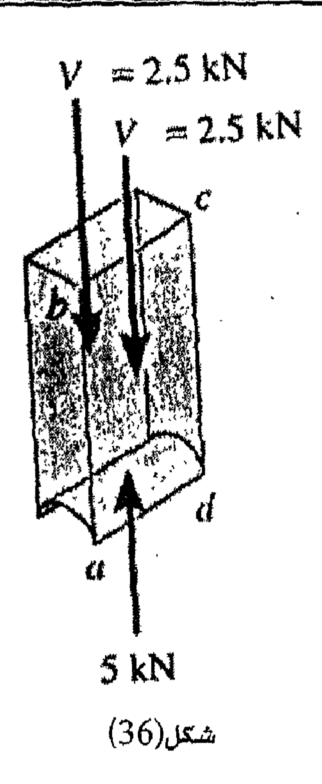
شكل(35)

الحل:

من مخطط الجسم الحر للعمود تظهر قوة قص مقدارها 5KN وتسبب إجهاد قص كما يلي:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{5000}{\pi(0.005)^2} = 63.7MP\sigma$$

أما مخطط الجسم الحر لمقطع مظلل في القطعة الخشبية هو:



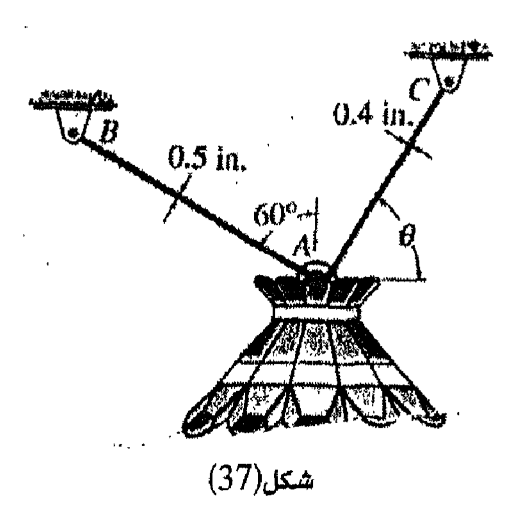
شكل(36)

وحيث تتوزع القوة 5KN إلى قوتين متسايتين كل منهما ترثر على منطقة مظللة، فإنّ إجهاد القص في كل منطقة مظللة:

$$\tau = V / A = \frac{25}{(0.04)(0.02)} = .012 MP\sigma$$

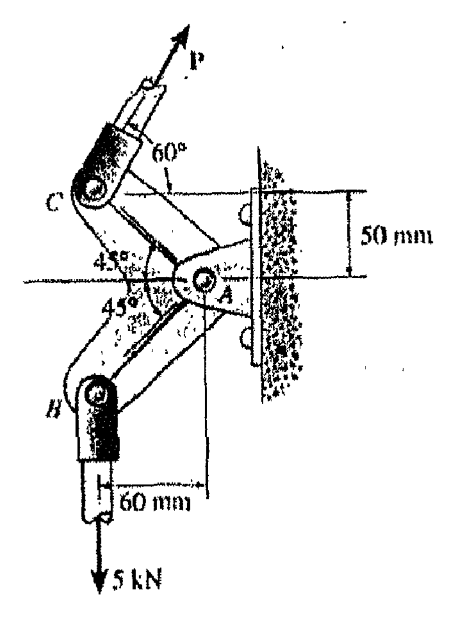
الأسئلة:

1) مصباح كهربائي وزنه 50 lb معلّق بواسطة قضيبين فولاذيين متصلين بحلقة عند A، أوجد الزاوية σ والتي تجعل الإجهاد في القضيبين AC ضعف الإجهاد في القضيب AB، وما هي قيمة الإجهاد في كل قضيب.



شكل(37)

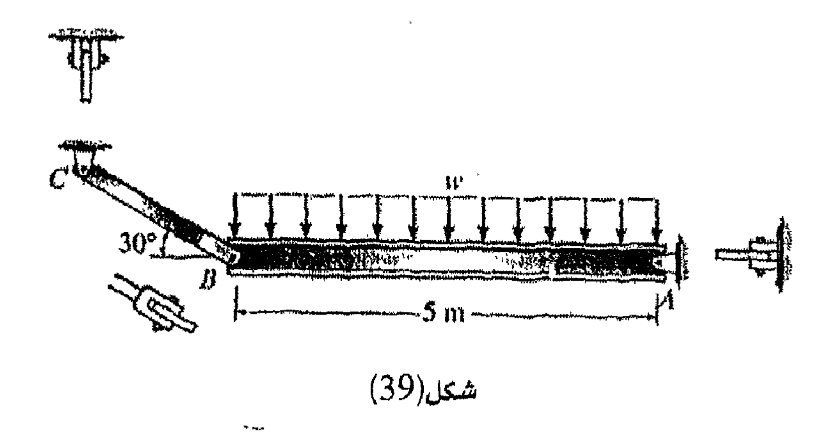
2) في ذراع التحكم الشكل(38) وهو في حالة إتزان، أوجد إجهاد القص المتولّد في المسامير A وB وC يتعرضان لقص مفرد، وأنّ كل مسمار قطره 10mm .



شكل(38)

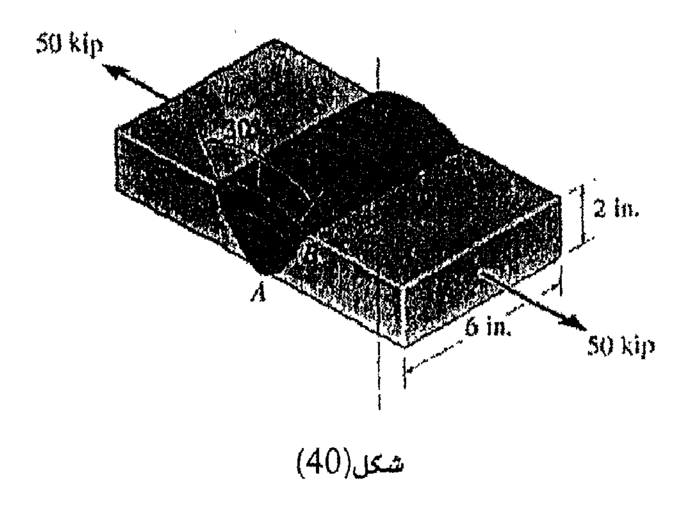
3) في العارضة المبينة في الشكل(39) والمحملة بحمل موزع مقدارها W= 2KN/m، احسب إجهاد القص المتولّد في المسامير A، B، C.

جميع المسامير معرّضة لقص مزدوج ولها قطر 18mm.



شكل(39)

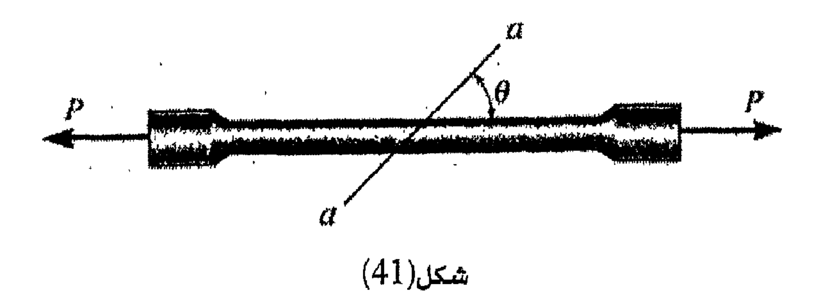
4) وصلة لحام تناكبية معرّضة لحمل مقداره 50Kip، احسب الإجهاد العمودي وإجهاد القص المتولّد في هذه الوصلة على الوجه AB.



شكل(40)

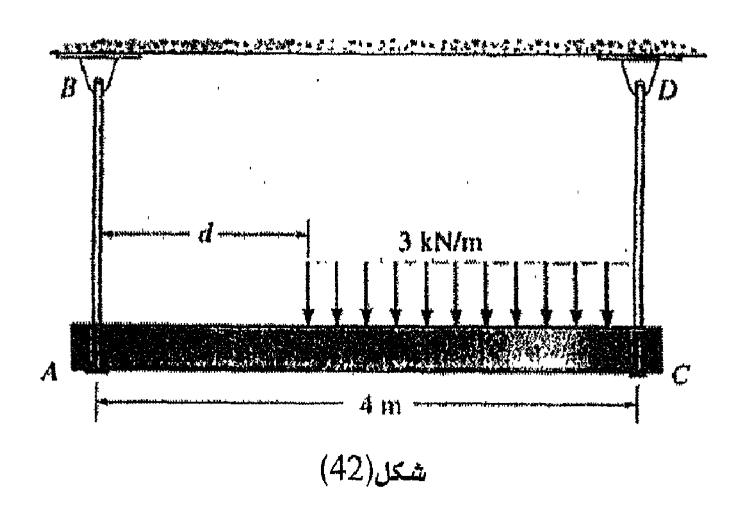
5) عينة اختبار لها مقطع مساحة A ومعرّضة لحمل مقداره P.

أوجد أقصى إجهاد قص والزاوية σ عند المقطع a-a.



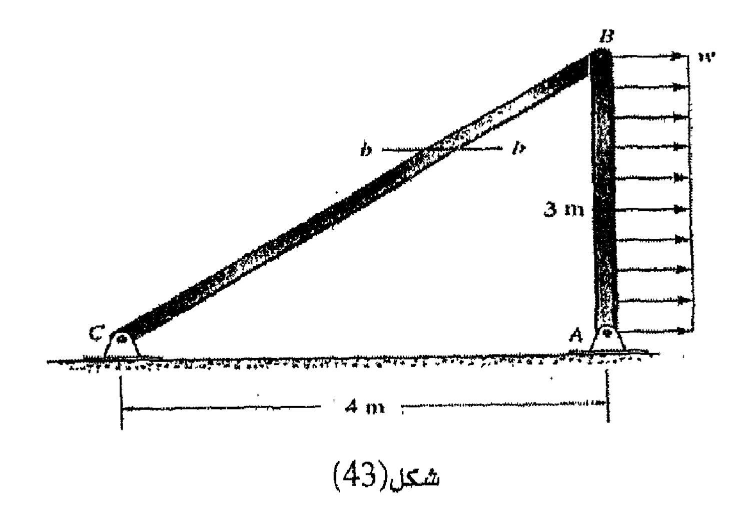
شكل(41)

6) عارضة مدعمة بقضيبين AB وCD ولهما مقطع مساحة مقدارها $10mm^2$ و$15mm^2$ على التوالي، أوجد الموقع(d) للحمل الموزّع حتى يصبح الإجهاد المتولّد في كل قضيب متساوٍ.



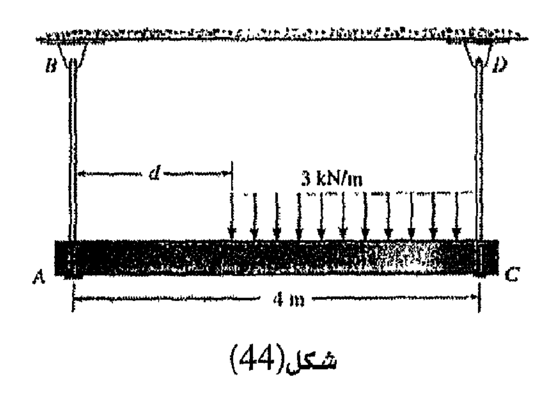
شكل(42)

7) هيكل ثنائي الأعضاء معرّض لحمل موزّع كما في الشكل(43)، أوجد مقدار الحمل الموزّع بانتظام qW والذي لا يتسبب في زيادة الإجهاد العمودي وإجهاد القص في المقطع b-b عن القيمة $\sigma = 5Mp\sigma$، $\tau = 16MP\sigma$ على التوالي، العضو CB له مقطع مساحة مربع 30mm من كل جانب.



شكل(43)

8) عارضة مدعمة بقضيبين AB وCD لهما مقطع مساحة 10mm2 و$15mm^2$ على التوالي، إذا علمت أنّ d = 1m، وجد الإجهاد المتولّد في كل قضيب.



شكل(44)

الوحدة الثانية

انحراف العوارض (العتبات) Deflection of Beams

انحراف العوارض(Deflection of Beams)

مقدمة:

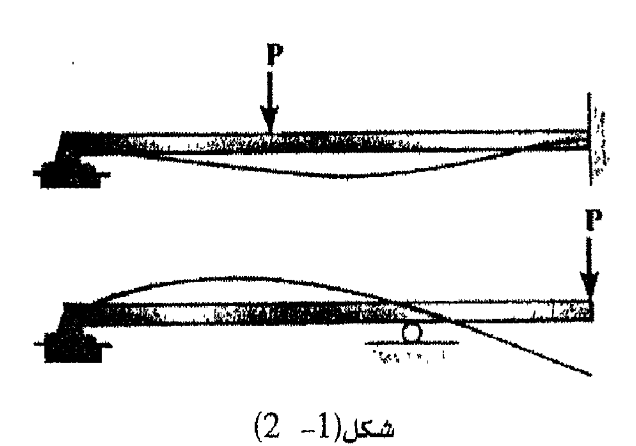
عند تعرض الأعمدة والعوارض لأحمال مختلفة فإنها تنحرف إنحرافاً يتناسب مع هذه الأحمال، لذا من الضروري وضع حدود لمقدار هذه الإنحرافات، لذا سوف يتم التعامل في هذه الوحدة مع طرق إيجاد الإنحراف والميل(الإنحدار) عند نقاط محددة على العوارض والأعمدة.

2.1 المنحنى المرن(The elastic curve):

قبل تحديد الميل(الإنحدار) والإزاحة لنقطة على عارضة أو عمود من المهم رسم الشكل المنحرف للعارضة عند تحميلها،إنّ مخطط الإنحراف للمحور الطولي والذي يمر خلال مركز الثقل لمقطع مساحة العارضة يسمى بالمنحنى المرن.

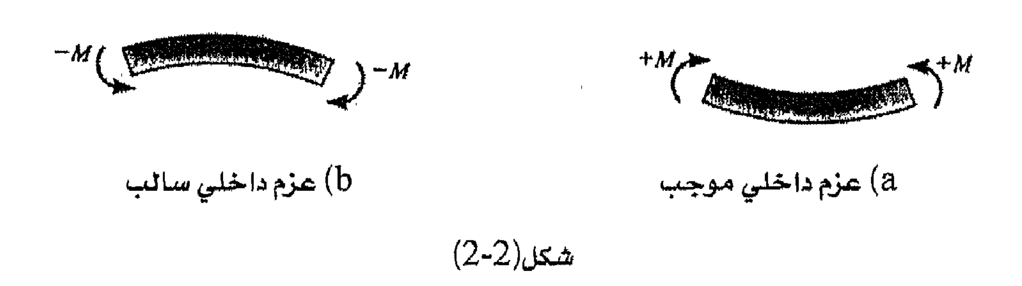
ولرسم المنحنى المرن يجب معرفة الميل(الإنحدار) والإزاحة المقيدة بواسطة المرتكزات المختلفة، وبشكلٍ عام المرتكزات التي تقاوم قوة مثل المسمار(المرتكز المفصلي) تقيّد الإزاحة، والمرتكزات التي تقام العزم مثل الجدران الثابتة(مرتكزات مقيدة) تقيّد الدوران أو الإنحدار.

والشكل(1- 2) يوضح مثالين للمنحنى المرن.



شكل(1- 2)

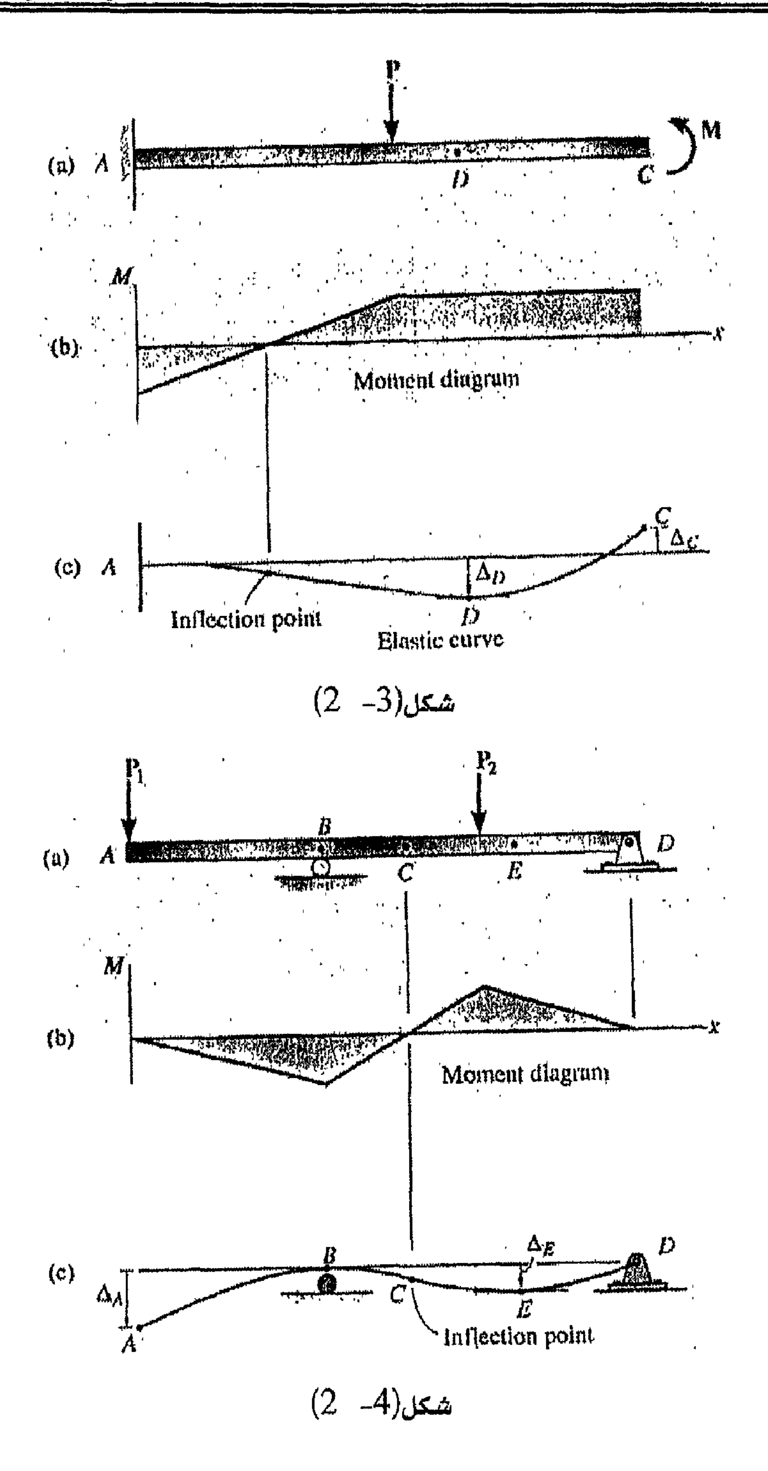
وإذا كان من الصعب إنشاء المنحنى المرن، فمن المقترح رسم مخطط العزم للعارضة، آخذين بالإعتبار الإشارة العزم المتعارف عليها حيث يكون العزم الداخلي موجباً إذا حاول العزم ثني العارضة للأعلى، ويكون العزم الداخلي سالباً إذا حاول العزم ثني العارضة للأسفل كما في الشكل(2-2).



a) عزم داخلي موجب b) عزم داخلي سالب

شكل(2-2)

ولنأخذ مثلاً العارضة شكل(3- 2) ومخطط العزم التابع لها تبعاً للمرتكز المفصلي والمرتكز الكروي(المتحرك) إنّ الإزاحة عند B وD يجب أن تكون مساوية للصفر، وخلال منطقة العزم السالب AC يجب أن يتقعر المنحنى المرن للأسفل وخلال منطقة العزم الموجب CD يجب أن يتقعر المنحنى المرن للأعلى، وبناءً على ذلك تكون النقطة C نقطة إنعطاف(Inflection Point) وهي النقطة التي يتحوّل عندها المنحنى من تقعّر لأعلى إلى تقعّر للأسفل وحيث تكون هذه النقطة صفرية العزم وهنا يعبّر عن الإزاحة عند $A(\Delta_A)$ والإزاحة(Δ_E) وعند النقطة E يكون الإنحدار للمنحنى المرن يساوي صفر وعندها يكون إنحراف العارضة أكبر ما يمكن، حيث أنّ Δ_E أكبر من Δ_A وهذا يعتمد نسبياً على مقدار P_1 و P_2 وموقع المرتكز الكروي(المتحرك) B وكذلك الأمر بالنسبة للشكل(2-4) المتعلق بالعارضة(العتبة) الناتئة حيث تكون أكبر إزاحة عند النقطة D حيث يكون الإنحدار عند النقطة C مساوياً للصفر.



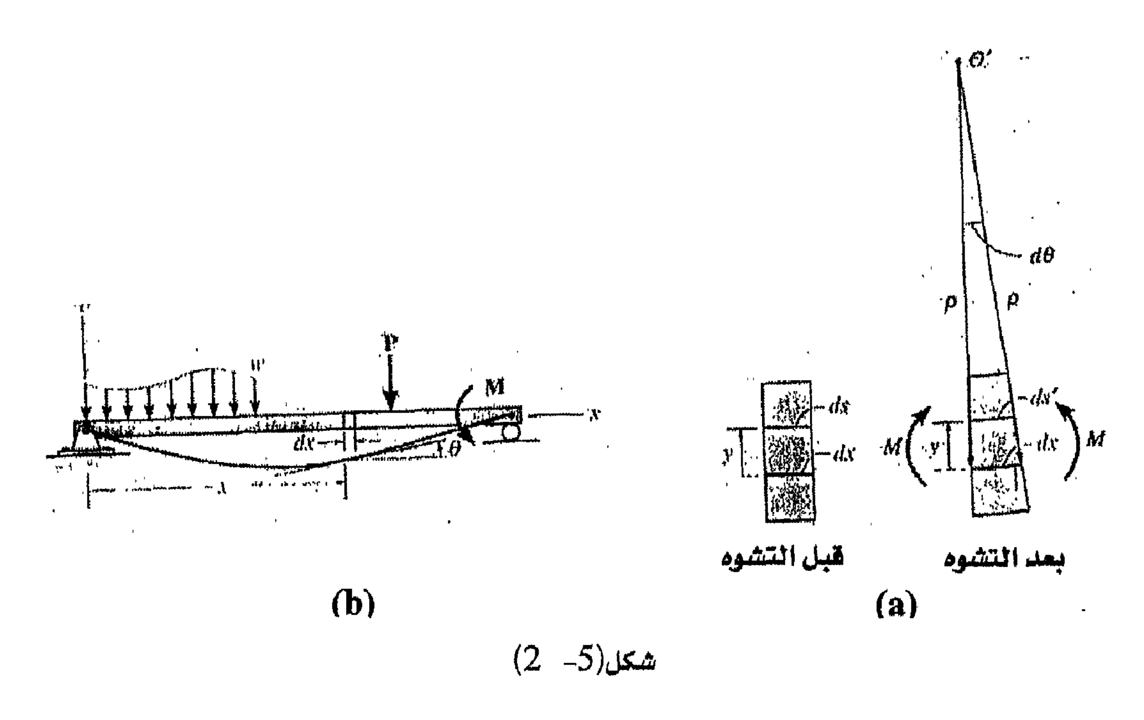
شكل(3- 2)

شكل(4- 2)

- **علاقة العزم- الإنحناء:**

لإنشاء علاقة بين العزم الداخلي في العارضة ونصف قطر الإنحناء(5- 2) للمنحنى المرن عند نقطة يجب إجراء بعض التحليلات والتي تقود في النهاية إلى علاقة واضحة بين العزم ونصف قطر الإنحناء.

وفي التحليل التالي نحتاج إلى ثلاثة محاور، محور x ويمتد بالإتجاه الموجب إلى اليمين على طول المحور الطولي للعارضة ويستخدم لتحديد موقع عنصر تفاضلي(dx)، ومحور y ويتخذ بالإتجاه الموجب للأعلى من محور X ويقيس الإزاحة لمركز ثقل مقطع المساحة للعنصر وباستخدام هذين المحورين يتم تعريف معادلة المنحنى المرن كإقتران بدلالة X، وأخيراً نستخدم محور y المعروف لتحديد موقع ليف(نسيج) العنصر في العارضة وتقاس بالإتجاه الموجب للأعلى من محور التعادل كما في الشكل(5- 2).



شكل(5- 2)

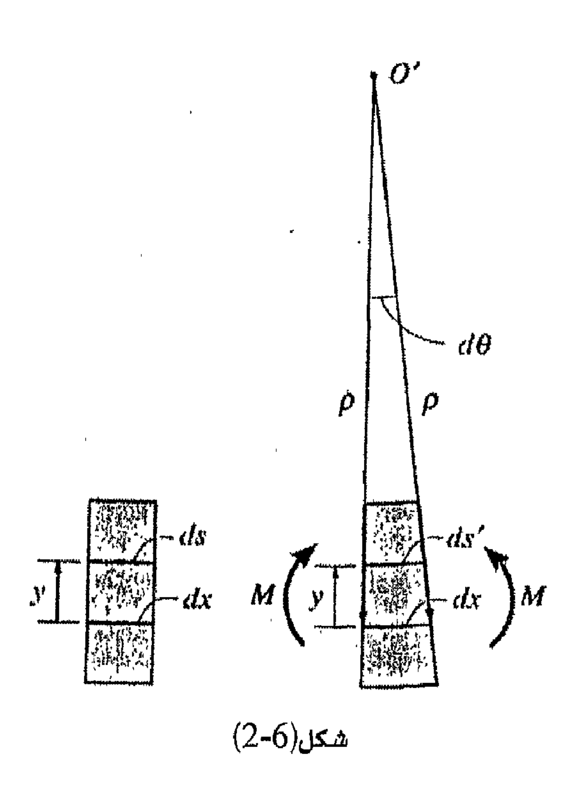
عندما يشوّه العزم الداخلي M العنصر في العارضة، تصبح الزاوية بين المقاطع dθ كما في الشكل(5- 2)، أمّا القوس d_x يمثل مقطع من المنحنى مرن والذي يتقاطع مع محور التعادل لكل مقطع، ويعرّف نصف قطر الإنحناء على أنّه المسافة ρ ∫ والمقاسة من مركز الإنحناء o' إلى dx.

وأي قوس على العنصر غير dx يتعرّض لإنفعال عمودي، على سبيل المثال الإنفعال في القوس ds والموجود في الموقع y من محور التعادل.

هو d_s $\varepsilon = (d'_s - d_s)$ ويما أنّ $d_s = d_x = \rho\ d\theta$ و $d'_s = (\rho - y)\ d\theta$).

وعليه يصبح الإنفعال $\varepsilon = [(\rho - d\theta(y - \rho\ d\theta] / \rho\ d\theta$

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\varepsilon}{y}$$



شكل(2-6)

وإذا كان المادة متجانسة وتتصرف بشكل خطي مرن، عندها يمكن تطبيق قانون هوك:

وحيث أنّ $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ و $\sigma = \frac{My}{I}$ ويجمع المعادلتين نحل على العلاقة التالية:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

حيث:

ρ : نصف قطر الإنحناء عند نقطة معينة في المنحنى المرن($1/\rho$ يشار إليها بالإنحناء).

M: العزم الداخلي للعارضة عند النقطة المراد تحديد ρ عندها.

E: معاير المرونة للمادة.

I: عزم القصور الذاتي للعارضة حول محور التعادل.

2.2 حساب الإزاحة والإنحدار بالتكامل:

يمكن التعبير رياضياً عن المنحنى المرن كإقتران $y = f(x)$ ، وللحصول على هذه المعادلة، يجب التعبير عن الإنحناء $(1/\rho)$ بدلالة Y وX.

وتكون هذه العلاقة كما يلي:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y/dx^2}{\left[1+(dy/dx)^2\right]^{3/2}}$$

وبما أن إنحدار المنحنى المرن والذي يحدد بالقيمة dy /dx ستكون قيمة صغيرة جداً ومربع هذه القيمة إهماله وبالتالي يمكن التعبير عن الإنحناء كما يلي:

$$\frac{1}{\rho} = d^2y/dx^2$$

وعليه تصبح العلاقة بين y و M كما يلي:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

ويما أنّ بين قوة القصV والعزم M هي V =dM/dx

$$\frac{d}{dx}\left(EI\frac{d^2y}{dx^2}\right) = V(x)$$

$$EI\frac{d^3y}{dx^3} = V(x)$$

وكذلك الأمر العلاقة بين الحمل الموزع W وقوة القص V هي: $-w = \frac{dV}{dx}$

$$\frac{d}{dx}\left(EI\frac{d^3y}{dx^3}\right) = -W(x)$$

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} = -W(x)$$

وعليه تصبح العلاقات التي تلزمنا في إيجاد الإزاحة والإنحدار للمنحنى المرن كما يلي:

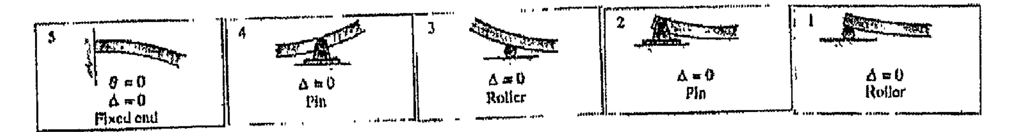
$$EI\frac{d^4y}{dx^4} = -W(x)\text{.........................}$$

$$EI\ \frac{d^3y}{dx^3} = V(x)\text{......... ....}$$

$$EI\ \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)\text{......... ....}$$

- **الشروط الحدّية والتواصلية(Boundary and Continuity Conditions).**

يمكن إيجاد ثوابت التكامل وذلك بتعويض قيمة إقترانات القص والعزم والإنحدار والإزاحة عند نقطة معينة في العارضة بحيث تكون قيمة الإقتران معروفة عندها، وتسمى هذه القيم بالشروط الحدّية، ومعظم هذه القيم أو الشروط الحدية تستخدم لإيجاد الإزاحة والإنحدار في العوارض والقضبان المحملة كما هو في جدول(7- 2).

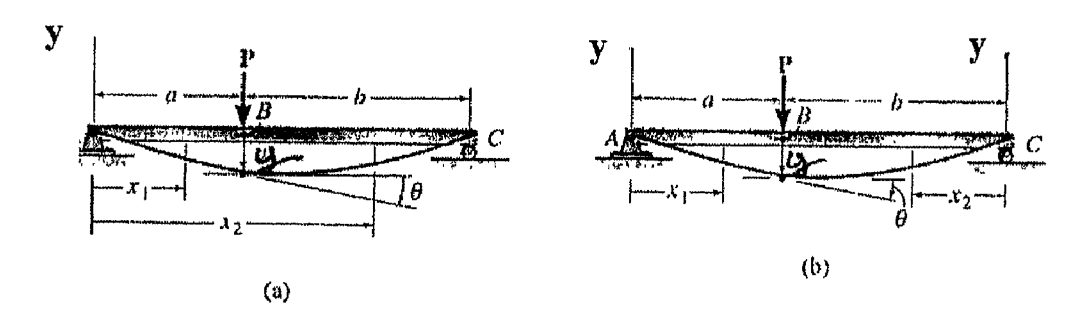


جدول(7- 2) الشروط الحدية لمختلف المرتكزات

وإذا لم تكن بالإمكان استخدام محور X للتعبير عن المعادلة للإنحدار أو المنحنى المرن للعارضة عندها يمكن إستخدام شروط التواصلية لتقييم بعض ثوابت التكامل على سبيل المثال شكل(a 8- 2) وعندها يمكن إخذ إحداثيات X من نقطة البدء A وجميعها صالحة في الفترة $0 \leq x1 \leq a$ والفترة $0 \leq x2 \leq (a+b)$ وبعد الحصول على اقتران الإنحدار والإنحراف يجب أن تعطي نفس القيم للإنحدار والإنحراف عند النقطة B وعليه يكون المنحنى المرن متواصل، وهذا يتضمن$\theta_2(a)$ $\theta_1(a)=$ و $y_1(a)= y_2(a)$ وهذه المعادلات تستخدم لإيجاد قيم ثابتين من ثوابت التكامل.

ومن ناحية أخرى عند التعبير عن المنحنى المرن بدلالة المنحنى المرن بدلالة الإحداثيات التالية:

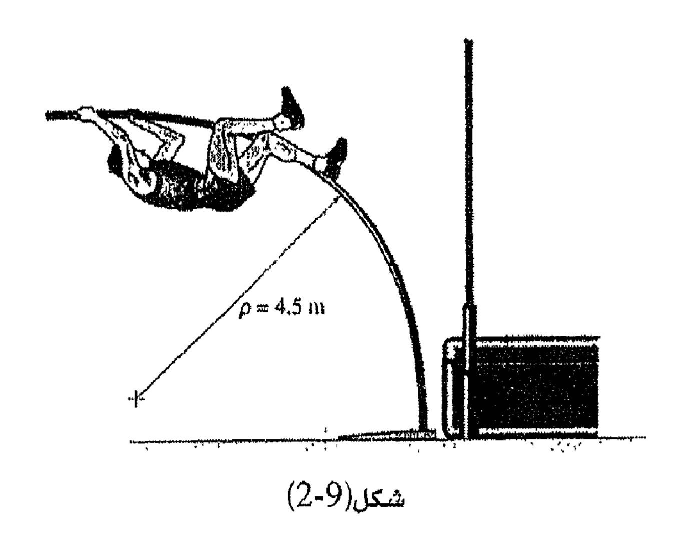
وكما في شكل(8b- 2)، فإنّ تواصلية الإنحدار والإنحراف عند النقطة B تتطلب انّ $y_1(\alpha) = y_2(b)$ وأنّ $\theta_1(\alpha) = -\theta_2(b)$.



شكل(8- 2)

أمثلة محلولة:

1. أخذت صورة للاعب يقفز باستخدام قصبة، فإذا كان أقل نصف قطر إنحناء لهذه القصبة 4.5m، وكان قطر هذه القصبة 40mm وكانت مصنوعة من بلاستيك مدعم بألياف زجاجية بحيث $E=131\ GP\alpha$، أوجد أقصى إجهاد عزم إنحناء للقصبة.



شكل(2-9)

الحل: نجد عزم القصور الذاتي للقصبة:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi (0.02)^4}{4} = 125.6 \times 10^{-9} m^4$$

وباستخدام نصف قطر الإنحناء:

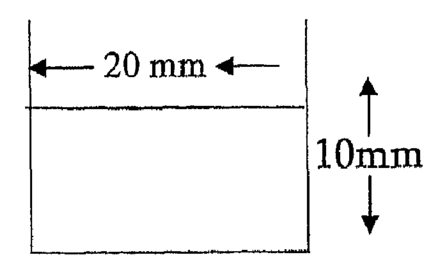
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

$$M = \frac{EI}{\rho} = \frac{131 \times 10^9 \times 125.6 \times 10^{-9}}{4.5}$$
$$= 3.66\ KN.m$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{3.66 \times 10^3 \times 0.02}{125.6 \times 10^{-9}}$$
$$= 582\ MPa$$

2. شريط فولاذي(E= 200GPa) سماكته 10mm وعرضه 20mm تمّ ثنيه على شكل قوس دائري نصف قطره $\rho = 10 \ m$، أوجد أقصى إجهاد عزم إنحناء.

الحل:



$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.02(0.01)^3}{12} = 1.67\times10^{-9} m^4$$

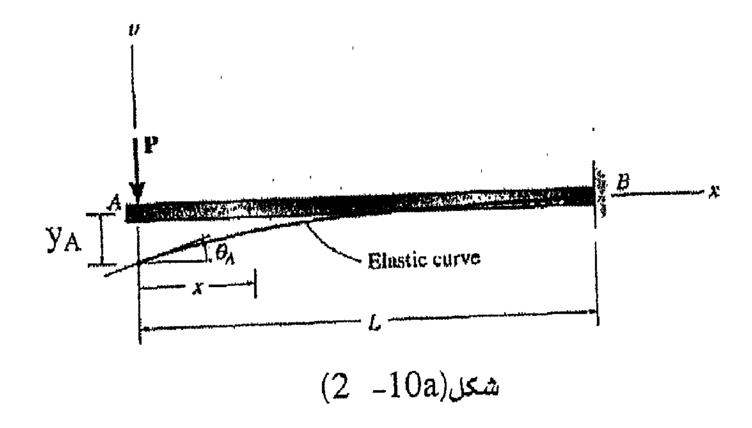
$$M = \frac{EI}{\rho} = \frac{200\times10^9\times1.67\times10^{-9}}{10}$$

$$= 33.4 N.M$$

$$\rho = \frac{Mc}{I} = \frac{33.4\times0.005}{1.67\times10^{-9}}$$

$$=100 MPa$$

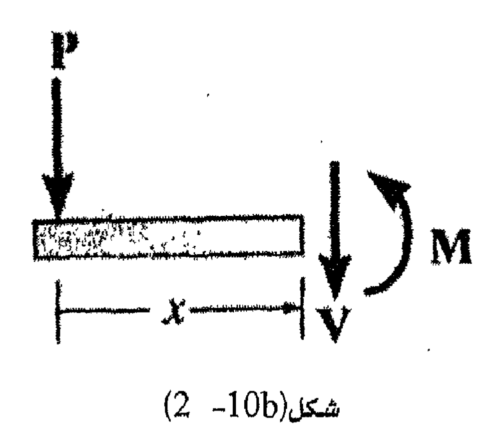
3. في العتبة(العارضة) الناتئة في الشكل(10- 2) والمعرضة لحمل عمودي على طرفها. أوجد معادلة المنحنى المرن، اعتبر EI ثابتة.



شكل(10a- 2)

الحل:

من رسم مخطط الجسم الحر على إعتبار M في الإتجاه الموجب.



شكل(2 -10b)

$M = -Px$

ولإيجاد الإنحدار($\theta = dy/dx$) والمنحنى المرن(y):

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = -px$$

$$EI\frac{dy}{dx} = \frac{-px^2}{2} + C_1$$

$$EIy = \frac{-px^3}{6} + C_1X + C_2$$

وباستخدام الشروط الحدّية: $\frac{dy}{dx} = 0$ عند X=L، و y =0 عند X =L.

$$0 = o' \frac{-PL^2}{2} + C_1$$

$$\Rightarrow C_1 = \frac{PL^2}{2}$$

$$0 = \frac{PL^3}{6} + C_1 L + C_2$$

$$C_2 = \frac{-pL^3}{3}$$

وعليه يمكن إيجاد معادلة الإنحدار:

$$\theta = \frac{P}{2EI}(L^2 - X^2)$$

وكذلك الأمر بالنسبة لمعادلة المنحنى المرن:

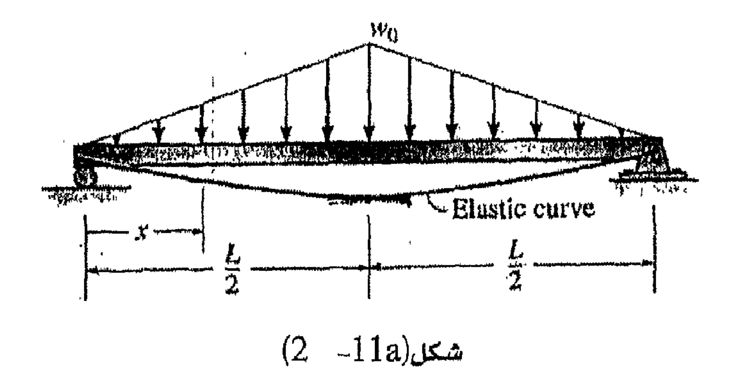
$$Y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3L^3 - 2L^3)$$

ويمكن إيجاد الإنحدار الأقصى والإزاحة القصوى عند(X=0).

$$\theta_A = \frac{PL^2}{2EI}$$

$$Y_A = -\frac{PL^3}{3EI}$$

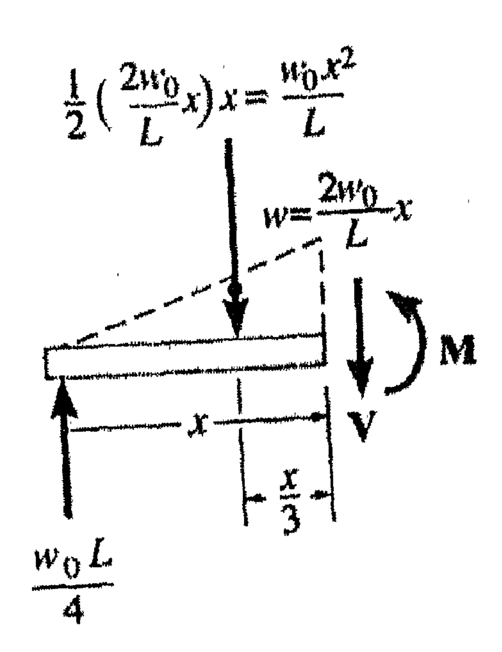
4. للعتبة(العارضة) البسيطة ومحملة بحمل موزع على شكل مثلث، أوجد أقصى انحراف لها، اعتبر EI ثابتة.



شكل(2 -11a)

الحل:

نتيجة للتماثل يكفي استخدام إحداثي X واحد للحل، وهو في هذه الحالة $0 \le x \le L/2$.



شكل(2 -12b)

$$W = \frac{2W_O}{L}X$$

$$\Sigma M_{NA} = 0; \qquad M + \frac{W_O X^2}{L}\left(\frac{X}{3}\right) - \frac{W_O L}{4}X = 0$$

ولإيجاد الإنحدار والمنحنى المرن نستخدم المعادلات التالية:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M = -\frac{W_O}{3L}X^3 + \frac{W_OL}{4}X$$

$$EI\frac{dy}{dx} = \frac{-w_o}{12L}X^4 + \frac{W_oL}{8}X^2 + C_1$$

$$EIy = \frac{-w_o}{60L}X^5 + \frac{w_oL}{24}X^3 + C_1X + C_2$$

يمكن إيجاد ثوابت التكامل باستخدام الشروط الحدّية التالية:

$$y = 0 \quad at \quad X = 0$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad at \quad X = \frac{L}{2}$$

$$\Rightarrow C_1 = \frac{-5W_OL^3}{192}, \qquad C_2 = O$$

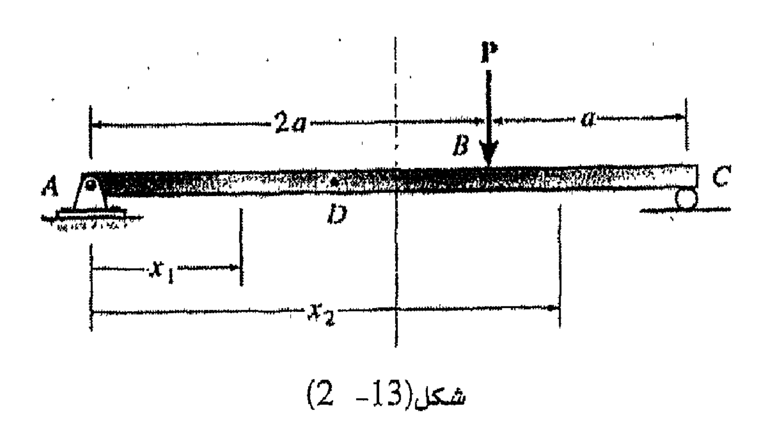
$$EI\frac{dy}{dx} = \frac{-W_OX^4}{12L} + \frac{W_OL}{8}X^2 - \frac{5W_OL^3}{192}$$

$$EIy = -\frac{W_O}{60L}X^5 + \frac{W_OL}{24}X^3 - \frac{5W_OL^3}{192}X$$

وعليه يكون أقصى إنحراف عند $X = L/2$:

$$y_{\max} = \frac{-w_ol^4}{120EI}$$

5. في العارضة البسيطة الموضحة في الشكل والمعرّضة لحمل مقداره p أوجد أوجد أقصى إنحراف لها، اعتبر EI ثابتة.



شكل(13- 2)

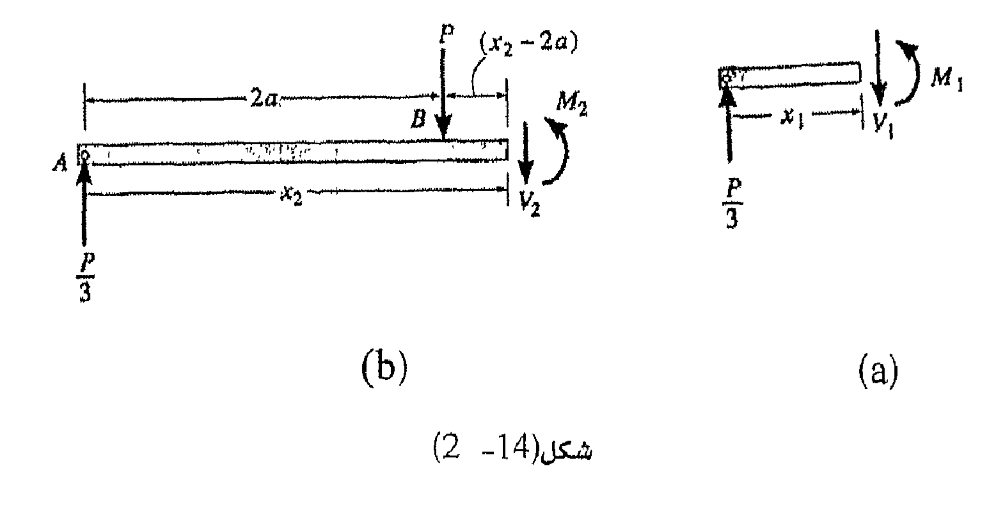
الحل:

عند إنحراف العارضة يجب استخدام إحداثيين حيث أنّ العزم يصبح غير متصل عند النقطةp، وهنا نستخدم X_1 و X_2 لهما نفس نقطة الأصل عندA وبالتالي:

$0 \leq X_1 < Za$

$2a < X_2 \leq 3a$

ومن خلال مخططي الجسم الحر:



(b) (a)

شكل(14- 2)

$$M_1 = \frac{P}{3} X_1$$

$$M_2 = \frac{P}{3} X_2 - P(X_2 - 2a) = \frac{2P}{3}(3a - X_2)$$

ولإيجاد الإنحدار والمنحنى المرن:

$$EI\frac{d^2y}{dx_1^{\,2}} = \frac{P}{3} X_1$$

$$EI\frac{dy_1}{dx_1} = \frac{P}{6} X_1^2 + C_1 \text{...} (1)$$

$$EIy_1 = \frac{P}{18} X_1^3 + C_1 X_1 + C_2 \text{...} (2)$$

$$EI\frac{dy^2}{dx^2} = \frac{2P}{3}(3a - X_2)$$

$$EI\frac{dy^2}{dx^2} = \frac{2P}{3}(3aX_2 - \frac{X_2^2}{2}) + C_3 \text{....................................} (3)$$

$$EIy_2 = \frac{2P}{3}\left(\frac{3}{2} a X_2^2 - \frac{X_2^3}{6}\right) + C_3 + C_4 \text{.............................} (4)$$

ويمكن إيجاد الأربعة ثوابت باستخدام شرطين حدّيين هما عند $X_1 = 0$ ⇐ $y_2 = 0$ وشرطين تواصليين يطبقان عند النقطة B وهما:

$$\frac{dy_i}{dx_1} = \frac{dy_2}{dx_2} \quad at \quad X_1 = X_2 = 2a$$

$$y_1 = y_2 \quad at \quad X_1 = X_2 = 2a$$

وبتعويض هذه الشروط في المعادلات ينتج:

$$y_1 = 0 \quad at \quad X_1 = 0; \quad 0 = 0 + 0 + C2$$

$$y_2 = 0 \quad atX_2 = 3a; \quad 0 = \frac{2P}{3}\left[(\frac{3}{2}a(3a)^2 - \frac{(3a)^2}{6}\right]$$

$$+ C_3(3a) + C_4$$

$$\frac{dy_1(2a)}{dx_1} = \frac{dy_2(2a)}{dx_2}; \frac{P}{6}(2a)^2 + C_1 = \frac{2P}{3}\left(3a(2a) - \frac{(2a)^2}{2}\right) + C_3$$

$$y_1(2a) = y_2(2a); \quad \frac{P}{18}(2a)^3 + C_1(2a) + C_2 \quad =$$

$$\frac{2P}{3}\left(\frac{3}{2}a(2a)^2 - \frac{(2a)^3}{6}\right) + C_3(2a) + C_4$$

وبحل هذه المعادلات نستنتج أنّ:

$$C_1 = \frac{-4}{9}Pa^2 \qquad C_2 = 0$$

$$C_3 = \frac{-22}{9}Pa^2 \qquad C_4 = \frac{4}{3}Pa^3$$

فتصبح المعادلات كما يلي:

$$\frac{dy_1}{dx_1} = \frac{p}{6EI}X_1^2 - \frac{4Pa^2}{9EI} \quad \text{...(5)}$$

$$y_1 = \frac{PX_1^3}{18EI} - \frac{4Pa^2X_1}{9EI} \quad \text{...(6)}$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \frac{2PaX_2}{EI} - \frac{pX_2^2}{3EI} - \frac{22Pa^2}{9EI} \quad \text{...(7)}$$

$$y_2 = \frac{PaX_2^2}{EI} - \frac{pX_2^3}{\alpha EI} - \frac{22Pa^2X_2}{3EI} + \frac{4Pa^3}{3EI} \qquad (8)$$

يحدث أقصى إنحراف عند النقطة D وعندها يكون الإنحدار = صفر.

$$\frac{1}{6}X_1^2 - \frac{4}{9}a^2 = O$$

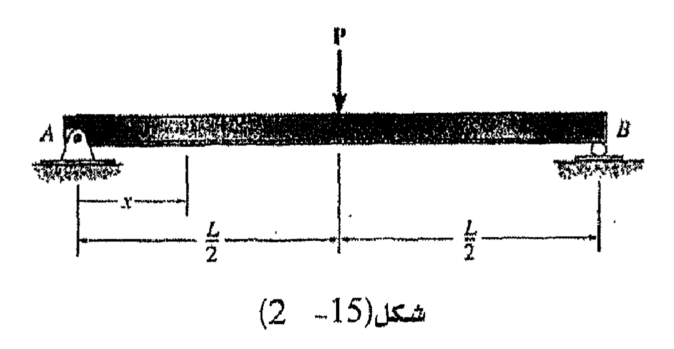
$$X_1 = 1.633a$$

$$y_{\max} = -0.484\frac{Pa^3}{EI}$$

تشير إشارة السالب إلى أنّ الإنحراف باتجاه الأسفل.

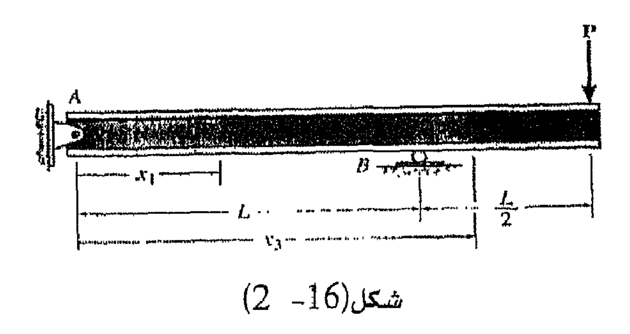
الأسئلة:

1) أوجد معادلة المنحنى المرن للعارضة التالية باستخدام الإحداثي X في الفترة $0 \le X < L/2$، وأوجد الإنحدار عند A وأقصى إنحراف للعارضة، اعتبر أنّ EI ثابتة.



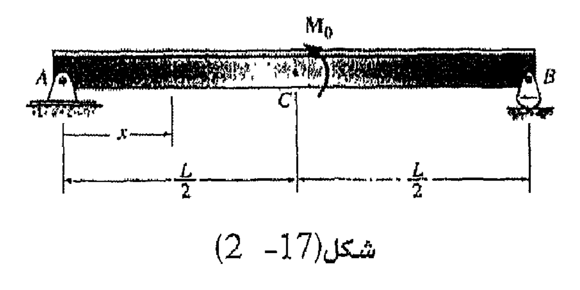
شكل(15- 2)

2) أوجد معادلة المنحنى المرن للعارضة التالية بإستخدام X_1 و X_3، وأوجد أقصى إنحراف للعارضة.



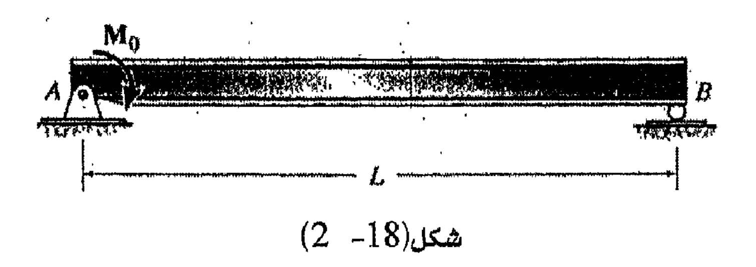
شكل(16- 2)

3) أوجد معادلة المنحنى المرن خلال الفترة $0 \le X \le L/2$ للعتبة البسيطة التالية، والمعرّضة لعزم مقداره M_O، كذلك أوجد أقصى إنحدار وأقصى إنحراف للعتبة، إعتبر EI ثابتة.



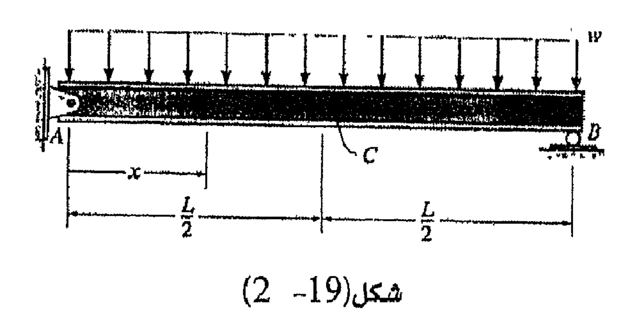
شكل(17- 2)

4) أوجد أقصى إنحدار وأقصى إنحراف للعتبة البسيطة والمعرّضة لعزم مقداره M_0، اعتبر EI ثابتة.



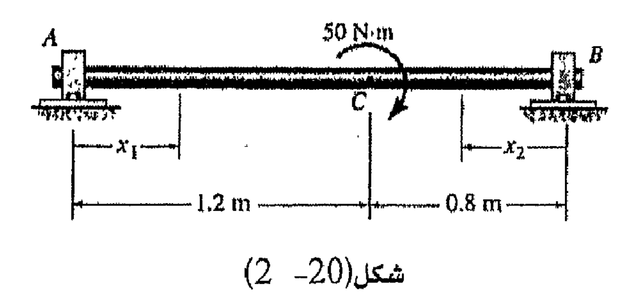
شكل(18- 2)

5) أوجد معادلة المنحنى المرن وأوجد الإنحدار عند النقطة A والإنحراف عند النقطة C، إعتبر EI ثابتة.



شكل(19- 2)

6) في العمود التالي المثبت عند A بمحمل لا إحتكاكي والذي يبدي رد فعل عمودي فقط وعند B بمحمل دفعي والذي يبدي رد فعل عمودي وأفقي على العمود، أوجد معادلة المنحنى المرن بإستخدام إجداثي X_1 وX_2.



شكل(20- 2)

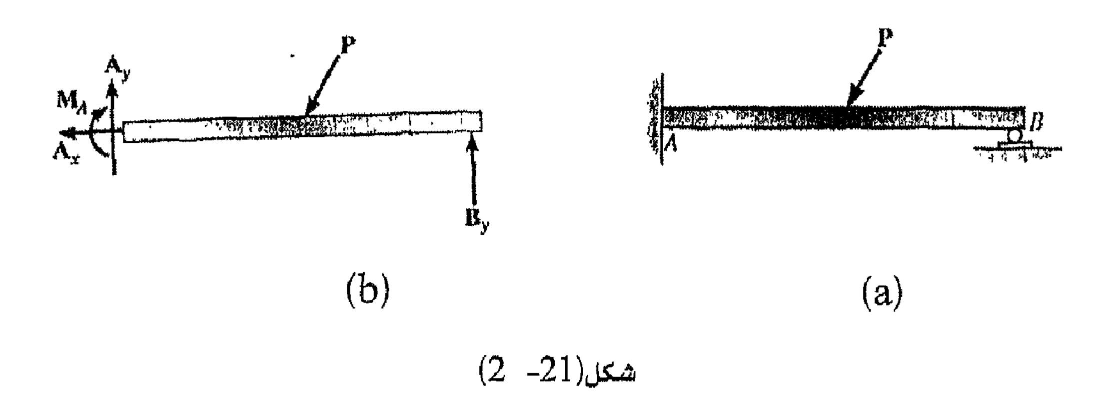
2.3 العوارض والعتبات غير المحددة استاتيكياً:

Staticlally In determinate beams

تصنف الأعضاء على أنها غير محددة إستكاتيكياً إذا كان عدد ردود الأفعال متجاوز لعدد معادلات الإتزان.

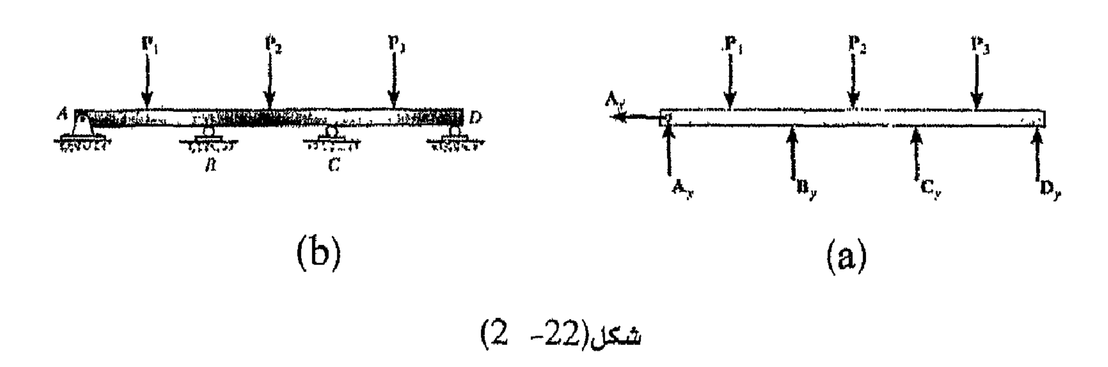
إنّ ردود الأفعال الإضافية على العارضة غير اللازمة للحفاظ على وضع إتزان العارضة تعتبر زائدة عن الحاجة، وإنّ عدد ردود الأفعال الزائدة تسمى درجة عدم التحديد(Degree of indeterminacy).

على سبيل المثال العارضة في الشكل(21- 2) عند رسم مخطط الجسم الحر يكون هناك أربعة ردود فعل وبما أنّ هناك ثلاثة معادلات إتزان يمكن إستخدامها، يمكن إعتبار هذه العارضة غير محددة إستاتيكياً من الدرجة الأولى ويمكن أعتبار A_y، B_y او M_A كرد فعل زائد، وعند إزالة أي منها تبقى العارضة في حالة إتزان.



شكل(21- 2)

وكذلك الأمر بالنسبة للعارضة شكل(22- 2) تعتبر غير محددة أستاتيكياً من الدرجة الثانية حيث أنّ هناك خمسة ردود فعل ويمكن إستخدام ثلاثة معادلات إتزان فقط، ويمكن إعتبار أي إثنين من ردود الفعل التالية A_y، B_y، C_y وD_y كردود فعل زائدة.



(b) (a)

شكل(22- 2)

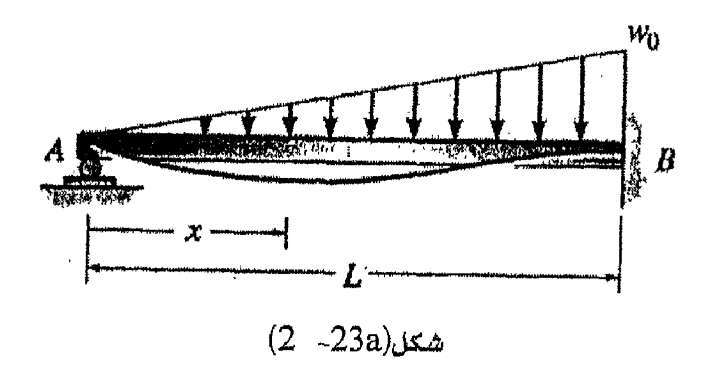
ولتحديد ردود الفعل على العارضة أو العتبة غير المحددة أستاتيكياً، يجب بدايةً تحديد ردود الأفعال الزائدة، ويمكن تحديد ردود الأفعال الزائدة من شروط الشكل الهندسي والمعروفة بإسم شروط التناغم(Compatibility Conditions).

- **العوارض والعتبات غير المحددة أستاتيكياً — طريقة التكامل:**

تتضمن طريقة التكامل تكاملين للمعادلة التفاضلية $\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{M}{EI}$، حيث أنّ العزم الداخلي M في العارضة يعبّر عنه كإقتران بدلالة الموقع X، وعندما تكون العارضة غير محددة إستاتيكياً يُعبّر عن العزم بدلالة ردود الفعل المجهولة الزائدة. وبعد إجراء التكامل لهذه المعادلة مرتين ينتج ثابتان للتكامل بالإضافة إلى ردود الفعل المجهولة الزائدة.

امثلة محلولة:

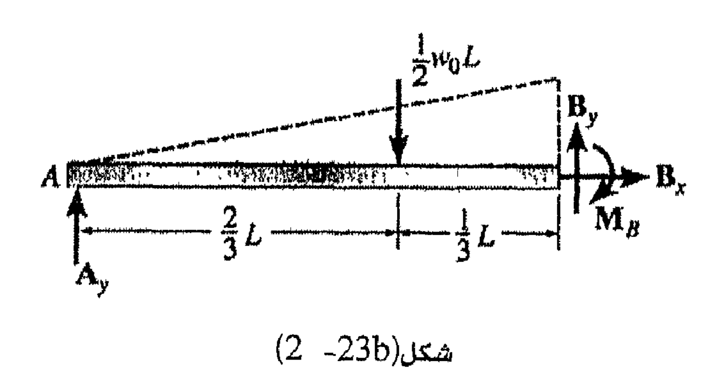
1. للعارضة المبينة في الشكل(2 -23a) والمعرّضة لحمل موزع، أوجد ردّ الفعل عند A اعتبر EI ثابتة.



شكل(2 -23a)

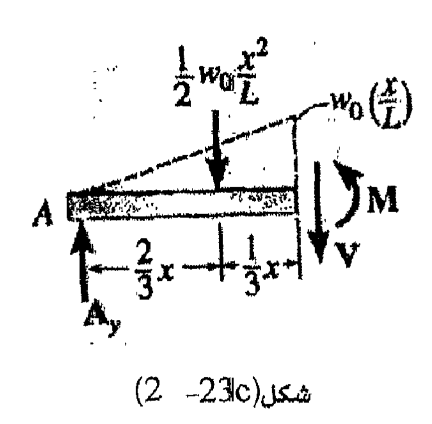
الحل:

من رسم مخطط الجسم الحر يتبيّن أنّ هذه العارضة غير محددة أستاتيكياً من الدرجة الأولى كما في الشكل.



شكل(2 -23b)

وحيث يمكن التعبير عن العزم الداخلي M بدلالة رد الفعل الزائد عند A كما في المقطع التالي:



شكل(2 -23c)

$$M = A_y x - \frac{1}{6} w_o \frac{x^3}{L}$$

ولإيجاد معادلة المنحنى المرن والإنحدار نستخدم المعادلات التالية:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = A_y X - \frac{1}{6}W_O\frac{X^3}{L}$$

$$EI\frac{dy}{dx} = \frac{1}{2}A_y X^2 - \frac{1}{24}W_O\frac{X^4}{L} + C_1$$

$$EIy = \frac{1}{6}A_y X^3 - \frac{1}{120}W_O\frac{X^5}{L} + C_1X + C_2$$

ويمكن إستخدام الشروط الحدّية التالية:

at $x = 0 \Rightarrow y = 0$

$$at \qquad X = L \Rightarrow \frac{dy}{dx} = 0$$

$$at \qquad X = L \Rightarrow y = 0$$

وعند تطبيق هذه الشروط ينتج:

$0 = 0 - 0 + 0 + C_2 \qquad X = 0,\ y = 0;$

$$X = L, \frac{dy}{dx} = 0; \quad 0 = \frac{1}{2} A_y L^2 - \frac{1}{24} WoL^3 + C_1$$

$$X = L, y = 0; \quad 0 = \frac{1}{6} A_y L^3 - \frac{1}{120} WoL^4 + C_1 + C_2$$

وبحل هذه المعادلات ينتج:

$$A_y = \frac{1}{10} WoL$$

$$C_1 = -\frac{1}{120} WoL^3, C_2 = 0$$

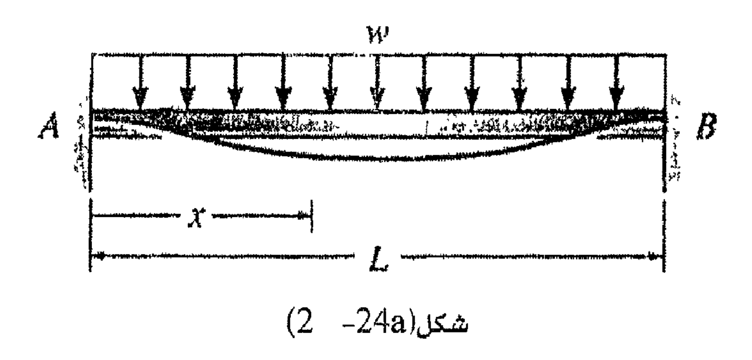
وبمعرفة رد الفعل عند A يمكن إستخراج ردود الفعل عند B باستخدام معادلات الإتزان الثلاثة ومنها ينتج:

$0B_x =$

$B_y = 2W_oL/5$

$M_B = W_oL^2/15$

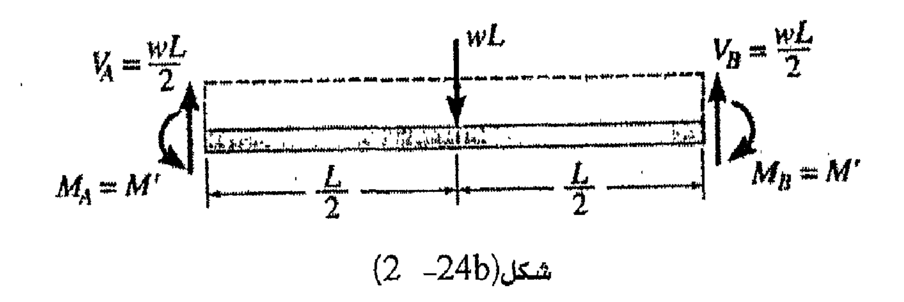
2. في العارضة التالية والمثبتة من الطرفين والمعرضة للحمل الموزع بإنتظام، أوجد ردود الفعل عند A وB، إهمل أثر القوى الأفقية.



شكل(2 -24a)

من مخطط الجسم الحر يتبيّن أنّ قوى القص وعزم الإنحناء عند A وB يجب أن يكون متساوية حيث أنّ هناك تماثل في التحميل والشكل الهندسي وعليه:

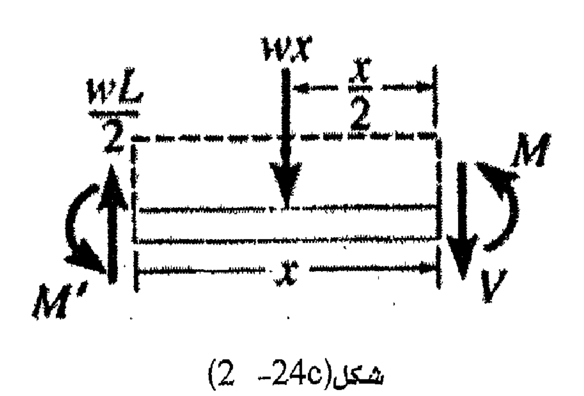
$$\sum F_x = 0; \Rightarrow V_A = V_B = \frac{WL}{2}$$



شكل(2 -24b)

ومن الواضح أنّ العارضة غير محددة إستاتيكياً من الدرجة، يمكن إعتبار M' رد فعل زائد، وبإستخدام المقطع في الشكل(2 -24c) يمكن التعبير عن العزم الداخلي M بدلالة M' كما يلي:

$$M = \frac{WL}{2}X - \frac{W}{2}X^2 - M'$$



شكل(2 -24c)

ولإيجاد الإنحدار والمنحنى المرن نطبق المعادلات التالية:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{wLx}{2}-\frac{w}{2}X^2-M'$$

$$EI\frac{dy}{dx}=\frac{wLX^2}{4}-\frac{wX^3}{6}-M'X+C_1$$

$$EIy=\frac{wlX^3}{12}-\frac{WX^4}{24}-\frac{M'}{2}X^2+C_1X+C_2$$

ويمكن تحديد المجاهيل C_1 و C_2 و M' من الشروط الحدية التالية:

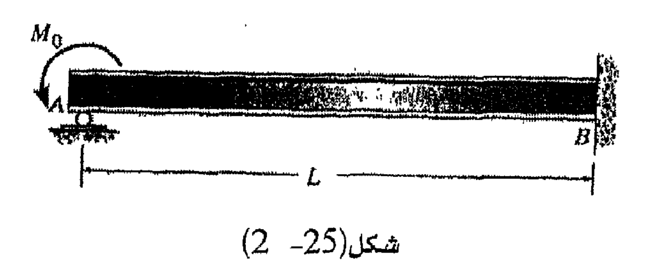
$$y=0 \quad at \quad X=0\Rightarrow C_2=0$$

$$\frac{dy}{dx}=0 \quad at \quad X=0\Rightarrow C_1=0$$

$$y=0 \quad at \quad X=L\Rightarrow M'=\frac{WL^2}{12}$$

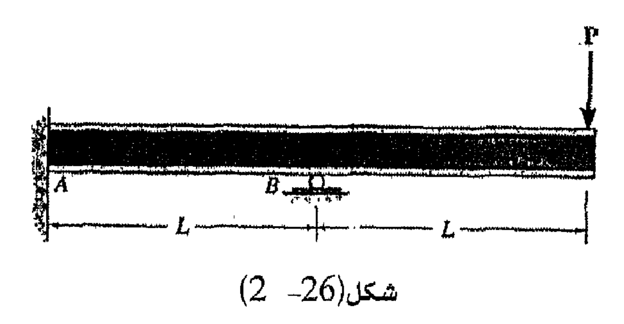
الأسئلة:

1) أوجد ردود الفعل عند المرتكزات AوB.



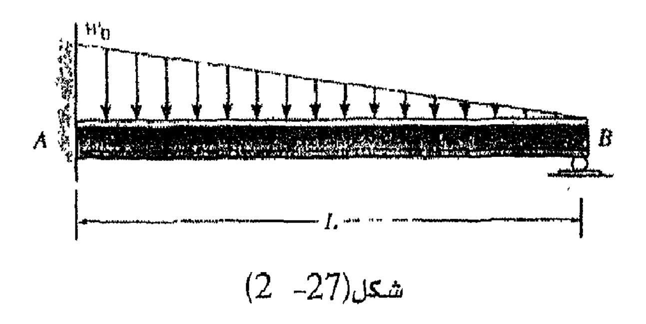
شكل(25- 2)

2) أوجد ردود الفعل عند المرتكزات A وB.



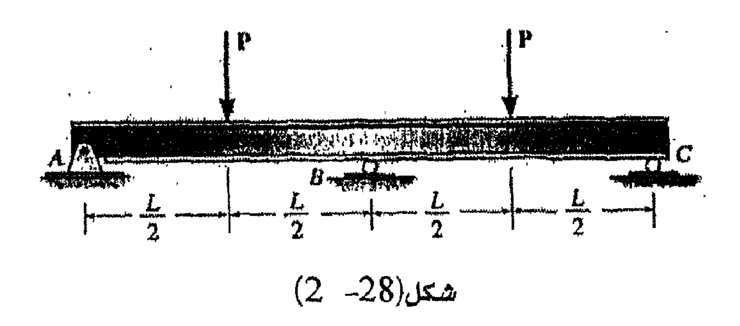
شكل(26- 2)

3) أوجد ردود الفعل عند المرتكزات AوB.



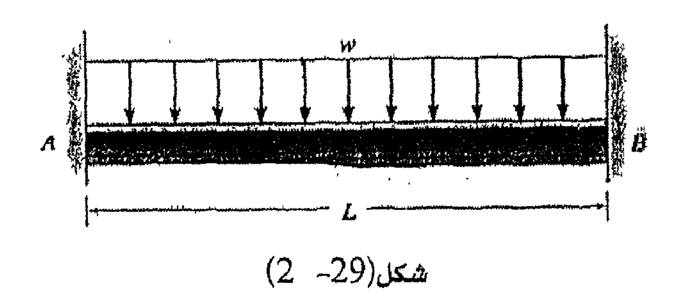
شكل(27- 2)

4) أوجد ردود الفعل عند A وB وC.



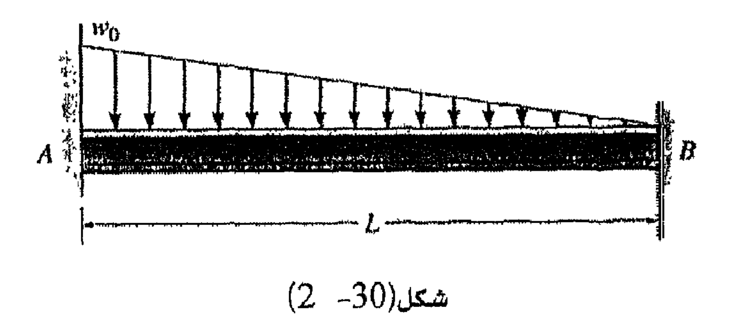
شكل(28- 2)

5) أوجد ردود الفعل عند المرتكزات Aو B.



شكل(29- 2)

6) أوجد ردود الفعل عند المرتكزات AوB.



شكل(30- 2)

الوحدة الثالثة

نظريات الإنهيار Failure's theories

نظريات الإنهيار

التحميل الأستاتيكي

مقدمة:

في هذه الوحدة يجب الأخذ بعين الإعتبار مقاومة مجموعة العناصر الميكانيكة بشكل جماعي.

- الحمل الأستاتيكي هو قوة ثابتة أو عزم مؤثر على عضو، وليبقى هذا الحمل ثابتاً يجب أن لا تتغيّر قيمته أو نقاط تأثيره أو إتجاهه والحمل الأستاتيكي قد يكون قوة محورية في حالة شد أو ضغط، قوة قص، عزم إنحناء، عزم ليّ أو قد يكون مجموعة هذه الأحمال.

وفي هذه الوحدة يجب تحديد العلاقة بين مقاومة الجزء والحمل الأستاتيكي المؤثر من أجل إختيار المادة المناسبة والأبعاد المناسبة والتي تفي بمتطلبات الجزء والتي تضمن له الأمان وعدم الإنهيار أثناء الخدمة.

وهناك غايتان يجب الوصول إليهما لتحقيق وإستيفاء هذه المتطلبات:

1. عامل الأمان(Factor Of Safety)، ويجب في هذه الطريقة أن يكون أكبر إجهاد أو إجهادات متولدة في الجزء أقل من أقل مقامة باستخدام عامل أمان مناسب وذلك للتأكد من عدم إنهيار هذا الجزء، وهذا يتضمن إعتبارات المادة والمعالجة والأبعاد.
2. الوثوقية، وتتضمن هذه الطريقة إختيار المواد، المعالجة والأبعاد بحيث أنّ إحتمالية الإنهيار تكون أقل.

3.1 المقاومة الأستاتيكية:(Static strength)

عند تصميم أي عنصر لآلة، يجب إجراء عدة فحوصات وإختبارات للمادة المراد إختيارها، وهذه الإختبارات تُجرى على عينات لها نفس المعالجة الحرارية، إنهاء السطح وحجم مماثل تماماً للعنصر المراد تصميمه، كما يجب أن تخضع العينة لنفس ظروف التحميل المعرّض لها العنصر أثناء الخدمة.

وهذا يعني أنّه عند تعرّض الجزء لعزم إنحناء يجب إختباره أيضاً بعزم إنحناء، وإذا تعرّض لعزم إنحناء وعزم ليّ فيجب فحصه على نفس ظروف التحميل أي عزم إنحناء وعزم ليّ، وهذه الإختبارات تفيد في إعطاء معلومات دقيقة وحساسة عن الجزء المراد تصميمه.

ويمكن تقييم أربعة تصنيفات للتصميم كما يلي:

1. إنّ إنهيار الجزء يمكن أن يسبب خطراً على حياة الإنسان، وعند إنتاج أعداد كبيرة من هذا الجزء يكون برنامج الفحص المحكم مبرّراً أثناء التصميم.
2. عند إنتاج أعداد كبيرة وكافية من هذا الجزء بحيث يكون من العملي جداً إجراء سلسلة من الفحوصات.
3. عند إنتاج كميات قليلة من الجزء بحيث يكون الفحص غير مبرر، أو يجب إنهاء التصميم بشكل سريع بحيث لا يكون هناك وقت كافٍ للفحص.
4. عند إنتاج جزء تمّ تصميمه وأثبتت الإختبارات عدم ملاءمته، يجب إجراء تحليل لمعرفة عدم الملاءمة وكيفية تطويره.

3.2 تركيز الإجهاد:(Stress Concentration)

يجب استخدام عامل تركيز الإجهاد K_f بشكل عام في الأحمال الأستاتيكية.

إنّ تركيز الإجهاد له تأثير محلي كبير، ففي بعض الأحيان قد يكون ناتج عن خدش سطحي، وإذا كانت المادة مطيلة فحتى الحمل العمودي سيسبب الخضوع بقرب الثلم الموجود في الجزء.

3.3 نظريات الإنهيار(الإخفاق):(Failure's theory)

عند تحميل جزء بحيث يكون الإجهاد أحادي المحور فعندها يمكن إجراء مقارنة بين الإجهاد والمقاومة لتحديد درجة الأمان، أو لمعرفة متى سوف ينهار هذا الجزء.

هذه الطريقة بسيطة وذلك لأنّ هناك قيمة واحدة للإجهاد وقيمة واحدة للمقاومة.

ويصبح الأمر أكثر تعقيداً عند وجود حالة من الإجهاد ثنائية أو ثلاثية المحور، وفي هذه الحالة تكون هناك مجموعة الإجهادات ولكن تبقى هناك مقاومة واحدة.

ولمعرفة أنّ هذا الجزء آمناً أم لا، هناك مجموعة من نظريات الإنهيار وضعت من أجل التنبأ بإنهيار الجزء.

3.4 نظرية أكبر إجهاد عمودي:

وتنص هذه النظرية على أنّ الإنهيار يحدث عندما يتساوى واحد من الإجهادات الرئيسية الثلاثة مع مقاومة المادة.

افرض أن ترتيب الإجهادات الرئيسية الثلاثة كما يلي:

$\sigma_2 > \sigma_3 \ \sigma_1 >$

وعندها تتنبأ النظرية بحدوث الإنهيار عندما:

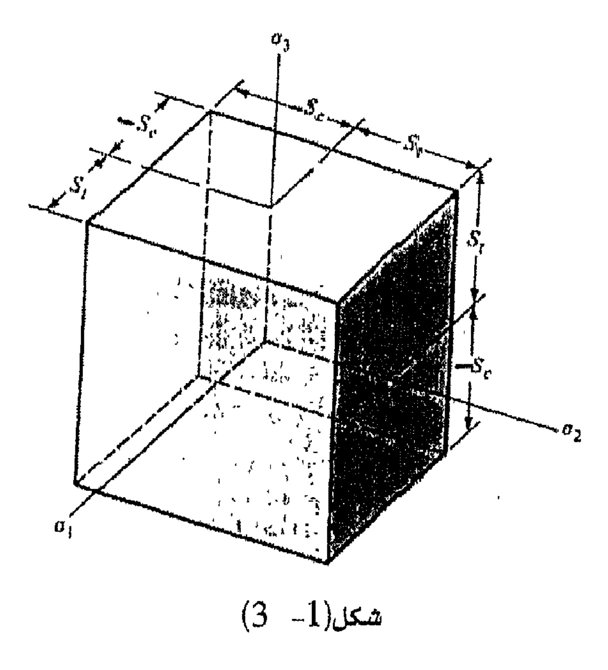
$\sigma_1 = S_t$ or $\sigma_3 = -S_c$

حيث أنّ:

S_t: مقاومة الشد.

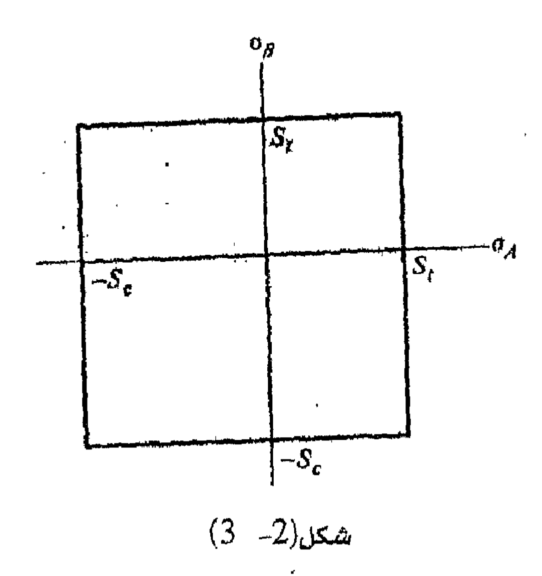
S_c: مقاومة الضغط.

وعادة ما تكون هذه المقاومات تمثل مقاومة الخضوع والمقاومة القصوى على التوالي.



شكل(1- 3)

يمثل الشكل العلاقة بين الإجهادات الرئيسية ومقاومة الشد والضغط



شكل(2- 3)

يمثل شكل(2- 3) مخطط نظرية أكبر إجهاد عمودي لإجهاد ثنائي المحور مستخدماً $Sc > S_t$، وأي قيمة إجهاد داخل هذا المخطط تعتبر في حالة أمان.

3.5 نظرية أكبر إجهاد قص:

وتنص هذه النظرية على أنّ الخضوع يبدأ عندما يصبح أكبر إجهاد قص في أي عنصر مساوٍ لأقصى إجهاد قص في عينة إختبار شد من نفس نوع المادة عندما تبدأ بالخضوع عند ترتيب الإجهادات الرئيسية الثلاثة كما يلي:

$\sigma_2 > \sigma_3 \; \sigma_1 >$

تتنبأ نظرية أكبر إجهاد قص أنّ الإنهيار يحدث عندما:

$$\tau_{\max} \geq \frac{S_y}{2} \quad or \, \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$

وكذلك تنص هذه النظرية على أنّ مقاومة الخضوع في القص تعطي بالعلاقة:

$$S_{sy} = 0.5 S_y$$

كما أنّ إجهادات القص الرئيسية تعطى بالعلاقة:

$$\tau_{1/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$\tau_{2/3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_{1/3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

تتنبأ هذه المعادلات بحدوث الإنهيار عندما يكون أي من إجهادات القص أكبر ما يمكن.

3.6 نظرية طاقة الإنفعال:

إنّ طاقة الإنفعال المختزنة في وحدة الحجم عندما تُجهد بشكل أُحادي المحور حتى تصل إلى مقاومة الخضوع تعطى بالعلاقة التالية:

$$U_s = \frac{S^2{}_y}{2E}$$

ويمكن إيجاد طاقة الإنفعال الكلية في وحدة الحجم والمعرّض إلى مجموعة إجهادات كما يلي:

$$U_{\sigma} = \frac{\varepsilon_1\sigma_1}{2} + \frac{\varepsilon_2\sigma_2}{2} + \frac{\varepsilon_3\sigma_3}{2}$$

$$= \frac{1}{2E}\left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)\right]$$

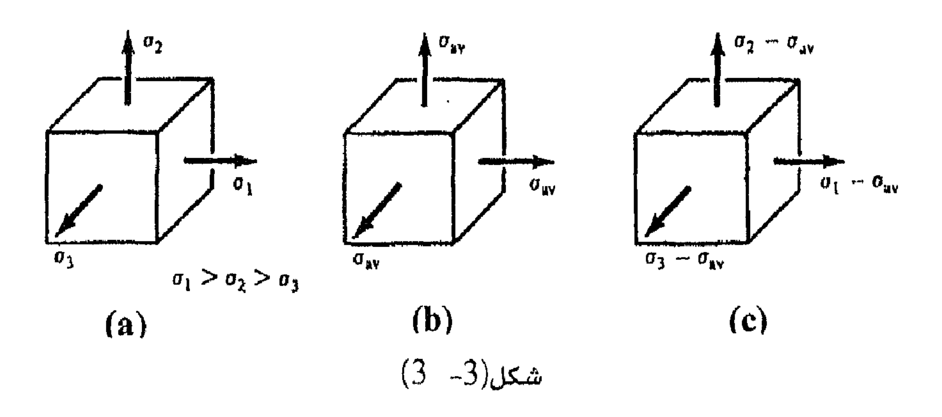
ولتطوير نظرية طاقة لتشوه دعنا ندرس وحدة حجم والمعرّض لثلاثة إجهادات يشار إليها بـ σ_1،σ_2،σ_3 في الشكل(3a- 3) أمّا حالة الإجهاد وفي الشكل(3b- 3) فتشير إلى الشد الهيدروستاتيكي نتيجة متوسط الإجهاد σ_{av} والمؤثر في نفس إتجاه الإجهادات الرئيسية.

حيث ن قيمة متوسط الإجهاد σ_{av} تعطي كما يلي:

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

إنّ العنصر في الشكل(3-3c) يتعرض إلى تغيّر صرف في الحجم أي لا يوجد تشوُّه زاوي.

وإذا إعتبرنا σ_{av} مركبة من الإجهادات الرئيسية σ_1،σ_2 وσ_3 فإنّ هذه المركبة يمكن طرحها من هذه الإجهادات لتنتج حالة إجهاد كما في الشكل (3c- 3)، وهذا العنصر يتعرض إلى تشوّه زاوي صرف أي لا يوجد تغيّر في الحجم.



شكل(3- 3)

إنّ طاقة الإنفعال اللازمة لإحداث تغيّر في الحجم يمكن الحصول عليه بتعويض قيمة σ_{av} بدل σ_1، σ_2 و σ_3.

$$U_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E}(1-2v)$$

ومنه:

$$U_v = \frac{1-2v}{6E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_1\sigma_3$$

وعليه يمكن إيجاد طاقة التشوه كما يلي:

$$U_d = U_\sigma - U_v = \frac{1+v}{3E}\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right]$$

وهنا يمكن أن تصبح طاقة التشوه صفراً إذا كانت $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

تتنبأ طاقة التشوه بحصول الخضوع عندما تُصبح طاقة التشوه في وحدة الحجم مساويةً لطاقة التشوه في نفس وحدة الحجم عندما تُجهد بشكل أُحادي المحور لتصل إلى مقاومة الخضوع، وفي إختبار الشد البسيط $\sigma_1 = \sigma'$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, تصبح طاقة التشوه:

$$\frac{1+v}{3E}\sigma'^2 \; U_d =$$

وعليه تصبح قيمة الإجهاد σ'

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_1-\sigma_3)^2}{2}\right]^{1/2}$$

وعليه يمكن حدوث الخضوع في حالة:

$$\sigma' \geq Sy$$

وبما أنّ الإجهاد σ' يمثل جميع الإجهادات σ_1، σ_2، σ_3 فإنها تُسمى بالإجهاد الفعال(effective stress) وتُسمى أيضاً بإجهاد فان ميز(Von Mises Stress).

ويمكن استخدام نظام ثنائي الإجهادات σ_Aو σ_B وهي إجهادات رئيسية غير صفرية للتعبير عن إجهاد فان ميسز كما يلي:

$$\sigma' = \left(\sigma_A^2 - \sigma_A\sigma_B + \sigma_B^2\right)$$

3.7 إنهيار(إخفاق) المواد المطيلة:

أثبتت الدراسات أنّ نظرية أكبر إجهاد قص ونظرية طاقة التشوه مقبولة في التصميم والتحليل للمواد التي تنهار بشكل مطيلي.

ولأغراض التصميم من السهل إستخدام نظرية أكبر إجهاد قص أمّا عند دراسة سبب إنهيار جزء معيّن فإنّ إستخدام نظرية طاقة التشوه هو الأفضل.

وإذا تمّ ترتيب الإجهادات الرئيسية: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ فإنّه في إختبار الشد البسيط تكون $\sigma_1 = S_y \qquad \sigma_2 = \sigma_3 = 0,$.

وعليه فإنّ أكبر قص عند الخضوع يساوي $\frac{\sigma 1}{2}$، وكذلك فإنّ نظرية أكبر إجهاد قص تتنبأ بمقاومة الخضوع في القص كما يلي:

$$S_{sy} = {Sy}/{2}$$

وبشكل عام يمكن تمثيل مقاومة الخضوع في القص كما يلي:

$$S_{sy} = \begin{cases} 0.5S_y & \text{نظرية أكبر إجهاد قص} \\ 0.577\ S_y & \text{نظرية طاقة التشوه} \end{cases}$$

وحالة خاصة عند وجود مجموعة من أحمال عزوم الإنحناء والإلتواء يمكن إيجاد قيم الإجهادات الرئيسية σ_A و σ_B بمعرفة σ_x و τ_{xy} كما يلي:

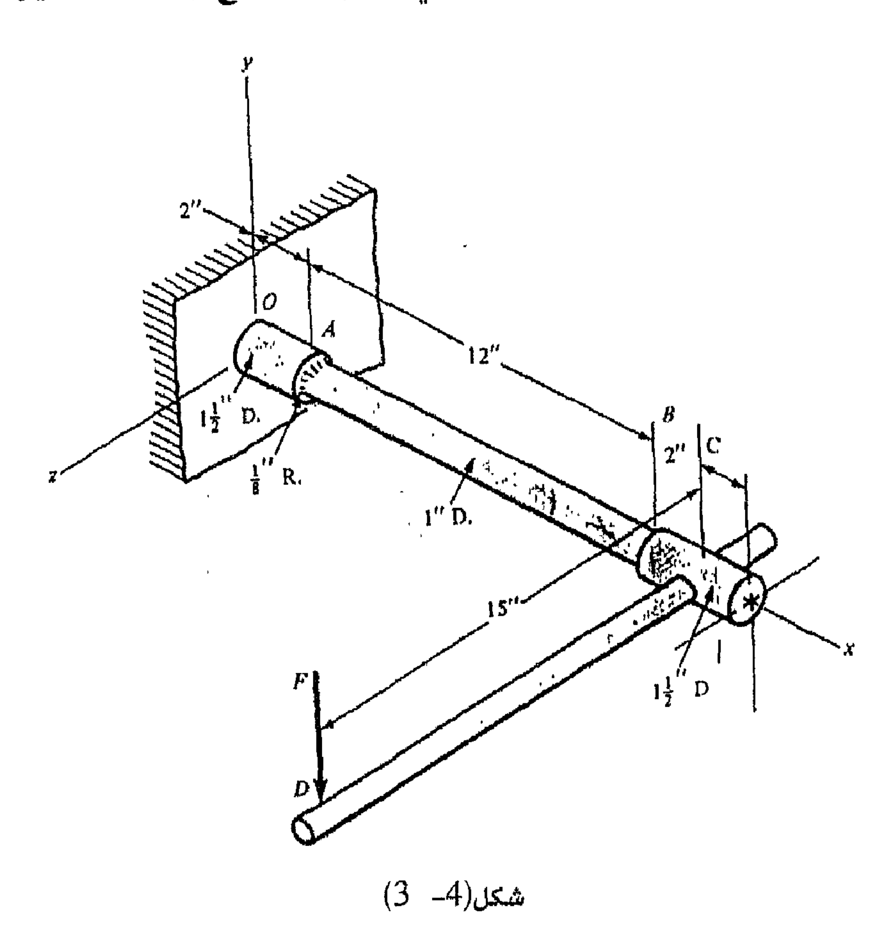
$$\sigma_A, \sigma_B = \frac{\sigma_x}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}$$

وعليه يمكن إيجاد إجهاد فان ميسز من العلاقة التالية:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$

أمثلة محلولة:

1) طبقت القوة F عند النقطة D في نهاية ذراع طوله"15، أدت إلى ظهور إجهادات في القضيب(OA BC) والمصنوع من الفولاذ الذي مقاومة الخضوع له 81ksi، المعالج حرارياً، أوجد مقدار القوةF والتي تسبب الخضوع في هذا القضيب.



شكل(4- 3)

الحل:

نحسب بداية الإجهاد العمودي المؤثر على القضيب(OA BC):

$$\sigma_X = \frac{Mc}{I} = \frac{M \times 0.5}{\frac{1}{4}\pi(0.5)^4} = \frac{(14F) \times 0.5}{\frac{1}{4}\pi(0.5)^4}$$

$$= 142.6F$$

كذلك الأمر نحسب إجهاد القص المؤثر على القضيب(OA BC):

$$\tau_{XY} = \frac{Tr}{J} = \frac{T \times 0.5}{\frac{1}{2}\pi(0.5)^4} = \frac{(15F) \times 0.5}{\frac{1}{2}\pi(0.5)^4}(0.5)^4 = 76.7F$$

ويتطبيق نظرية طاقة التشوه ينتج:

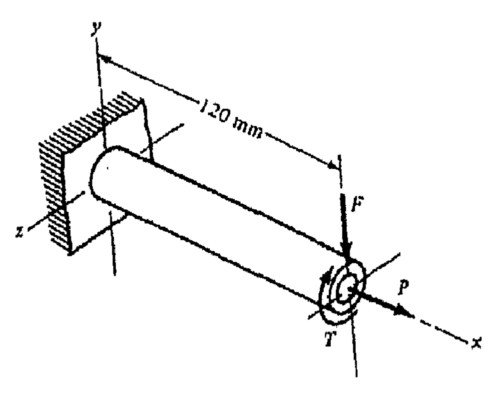
$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} = \left[(142.6F)^2 + 3(76.4F)^2\right]^{1/2}$$
$$= 195F \quad Psi$$

وبمساواة إجهاد فان ميسز بمقاومة الخضوع، يمكن إيجاد القوة التي تسبب الخضوع كما يلي:

$$S_y = 195F$$

$$F = \frac{81000}{195} = 415lb$$

2) أنبوب من سبيكة الألمنيوم المعالج حرارياً ومقاومة الخضوع له 276Mpa تؤثر عليه قوة عمودية مقدارها 1.75KN وقوة شد محورية مقدارها 9KN، وعزم ليّ مقداره 72N.m، إذا علمت أنّ قطره الخارجي 50mm وقطره الداخلي 42mm، أوجد إجهاد فان ميسز، وهل يحدث خضوع أم لا ؟.



شكل(5- 3)

الحل:

نجد أولاً الإجهاد العمودي المؤثر على الأنبوب:

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I} + \frac{P}{A}$$

$$\sigma_x = \frac{(0.12 \times 1.75 \times 10^3) \times 0.025}{\frac{1}{4}\pi(0.025^4 - 0.021^4)} + \frac{9 \times 10^3}{\pi(0.025^2 - 0.021^2)}$$

$$= 34 \times 10^6 + 15.57 \times 10^6 = 49.57 MPa$$

ثمّ نجد إجهاد القص المؤثر على الأنبوب كما يلي:

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = \frac{72 \times 0.025}{\frac{1}{2}\pi(0.025^4 - 0.021^4)} = 5.8 MPa$$

وعليه يمكن إيجاد إجهاد فان ميسز من العلاقة التالية:

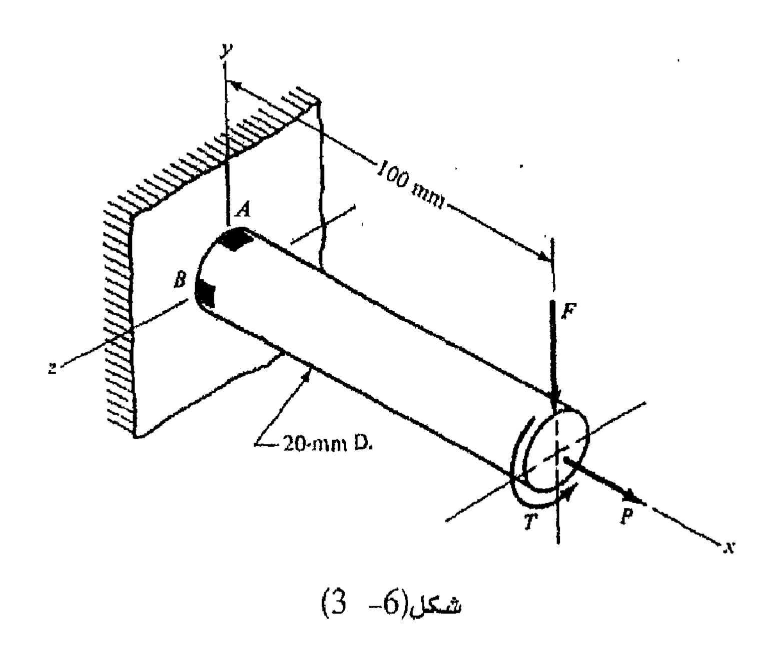
$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau^2_{xy})^{1/2}$$

$$= \left[(49.57)^2 + 3(5.8)^2\right]^{1/2} = 50.6 MPa$$

بما أن $\sigma' \Leftarrow S_y >$ لا يحدث خضوع في الأنبوب.

الأسئلة:

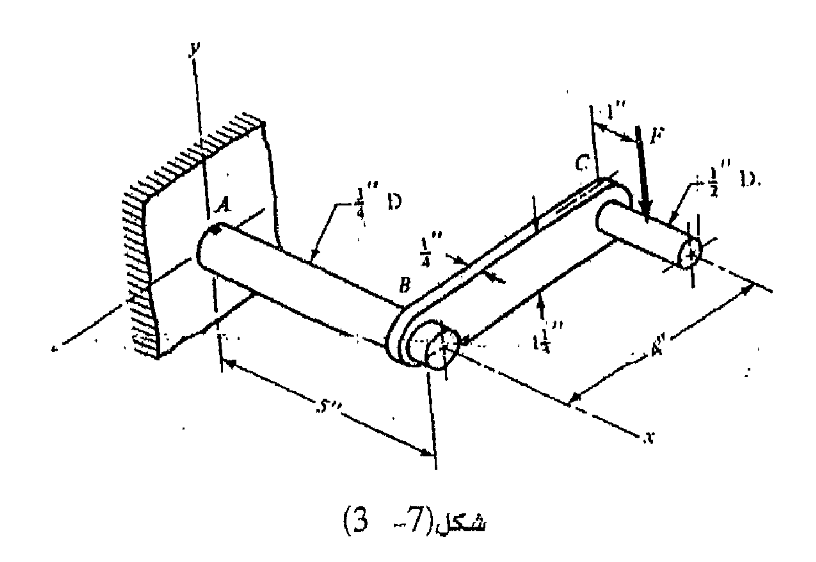
1) وضح المقصود بنظرية أكبر إجهاد عمودي.
2) وضح المقصود بنظرية أكبر إجهاد قص.
3) وضح المقصود بإجهاد فان ميسز.
4) أوجد إجهاد فان ميسز عند النقطة A والنقطة B في العضو المبيّن في الشكل(6- 3) إعتبر أنّه مصنوع من الفولاذ المسحوب على البارد ومقاومة الخضوع له 280Mpa ومحمّل بقوة عمودية F= 0.55KN، وقوة شد محورية P=8 KN، وعزم ليّ مقداره T= 30N.m، بيّن فيما إذا يحدث خضوع لهذا العضو أم لا؟



شكل(6- 3)

5) أنبوب فولاذي مسحوب على البارد مقاومة الخضوع له 320Mpa وقطره الخارجي 300mm وقطره الداخلي 200mm ومعرّض لقوة شد محورية وعزم ليّ مقداره 100N.m أوجد مقدار قوة الشد التي تسبب الخضوع لهذا الأنبوب.
6) في الشكل التالي إذا علمت أنّ عمود المرفق محمّل بقوة F= 300Lb والتي تسبب اللّي وعزم الإنحناء للمحور AB، إذا علمت أنّ هذا المحور مصنوع من

الفولاذ المدرفل على الساخن والذي مقاومة الخضوع له $S_y = 32$ ksi، بيّن هل سيحدث إنهيار في هذا المحور أم لا مستخدماً نظرية أكبر إجهاد، كذلك هل سيحدث خضوع في هذا المحور أم لا ؟



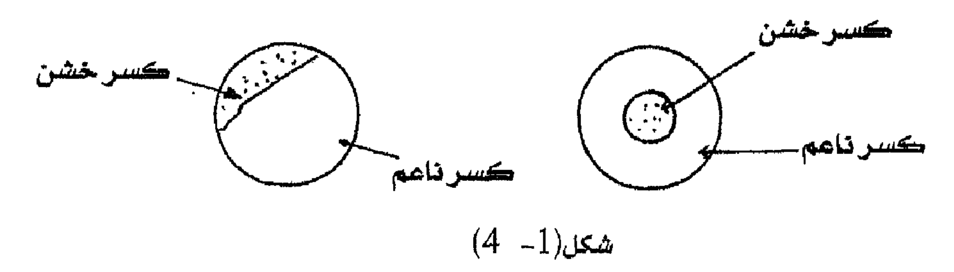
شكل(7- 3)

تعب المعادن (Fatigue)

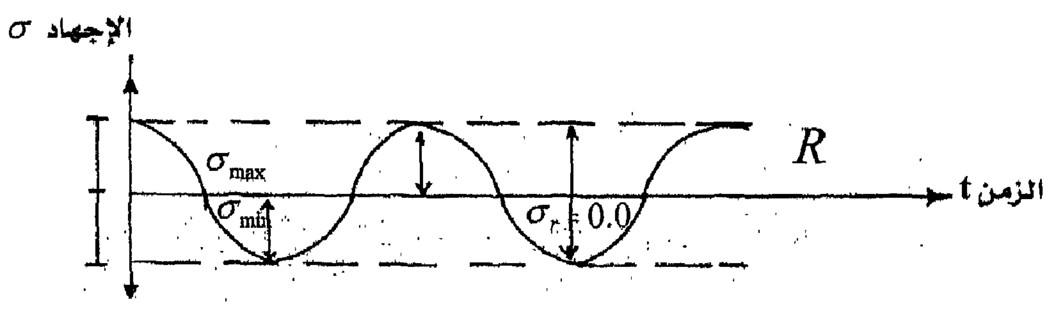
تعب المعادن
Fatigue of Metals

عند تعرض المنشآت أو الماكينات لأحمال متكررة ينتج عنها إجهادات متكررة أثناء التشغيل تسبب انهيار مفاجئ لهذه المنشآت أو الماكينات ويكون هذا الإنهيار عند إجهاد أقل من الإجهاد الذي يسبب الإنهيار بها لو لم تكن هذه الإجهادات متكررة وهذه الظاهرة تسمى تعب المعادن(كلال المعادن) ويكون شكل الكسر كما بالشكل(1- 4) جزء من المقطع ناعم وهو الذي بدأ عنده الإنهيار والجزء الباقي خشن وهو الذي ينتهي عنده الإنهيار، ويحدث الإنهيار بالكلال في مواقع عدم التجانس الداخلية أو عند أماكن العيوب السطحية والتغير المفاجئ في المقطع ويبدأ في الجزء من القطاع المعرض لإجهادات عالية ويمتد لباقي أجزاء المقطع بالتدريج.

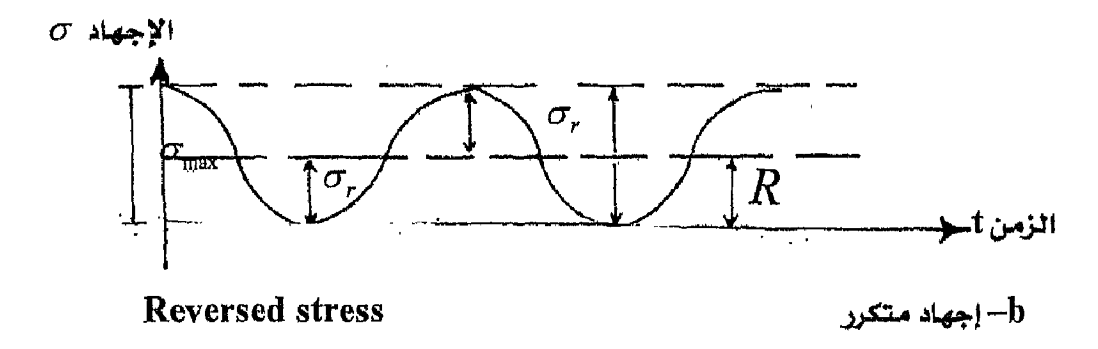
ويكثر حدوث هذا الإنهيار بالكلال في أجزاء الماكينات والطائرات والسيارات والمنشآت التي تتعرض لأحمال متكررة مما يتسبب في حدوث انهيار بعد عمر قصير من الإستعمال، وللتغلب على ذلك لا بد من تصميم هذه الأجزاء بإجهادات تصميم أقل من الإجهادات العادية المستعملة فعند التصميم لأجزاء الماكينات والمنشآت الغير معرضة لأحمال وإجهادات متكررة.



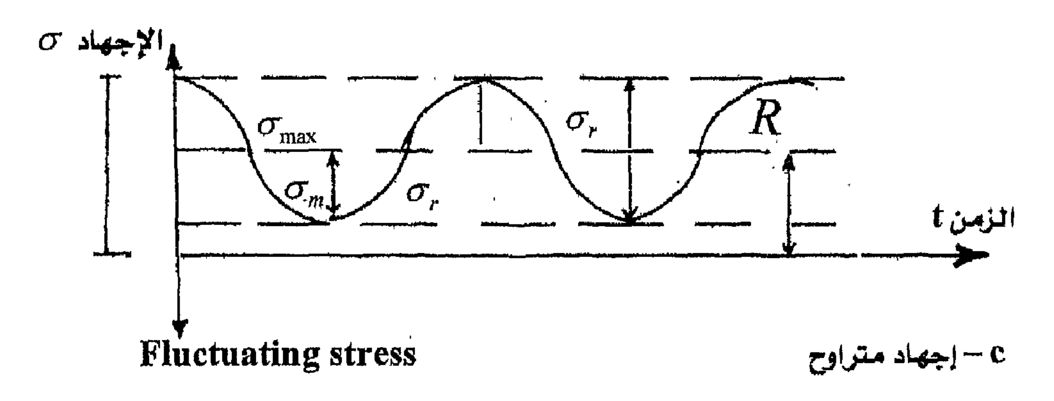
شكل(1- 4)



Alternating stress a– إجهاد متغيّر



Reversed stress b– إجهاد متكرر



Fluctuating stress c – إجهاد متراوح

شكل(2- 4)

الأحمال المتكررة: Repeated Loads

الحمل المتكرر هو الحمل الذي يسبب إجهادات تتكرر عدد من الدورات وتأخذ إحدى الصور الآتية والمبينة بالشكل(2- 4).

أ. إجهادات متغيرة: Alternating Stress.

الشكل(2a- 4) يبين إجهاد متغير وفيه:

$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \sigma$

$$\sigma_{mean} = \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0.0$$

$Range \quad stress = R = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma$ مدى الإجهاد.

ب. إجهادات متكررة: Reversed Stresses

الشكل(2b- 4) يبين إجهاد متكرر وفيه:

$\sigma_{min} = 0.0 \qquad \sigma_{max} = \sigma$

$$\sigma_{mean} = \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma}{2}$$

$Range\ Stress = R = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma$ مدى الإجهاد.

ج. إجهادات متراوحة: Fluctuating Stresses

الشكل(2c- 4) يبين إجهاد متراوح وفيه:

$$\sigma_{max.} = \sigma_1, \sigma_{min.} = \sigma_2, \sigma_{mean} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

مدى الإجهاد. $Range\ stress = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_1 - \sigma_2$

وعلى ذلك يمكن اعتبار الإجهادات المتكررة عبارة عن إجهاد ثابت σ_m مضافاً إليه متغير بقيمة σ_r وبذلك يكون:

(الإجهاد الأقصى) $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_r$

(الإجهاد الأدنى) $\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_r$

إجهاد حد الإحتمال:

هو أقصى إجهاد ذو مدى محدود ومعكوس كلياً يؤثر على المعدن بحيث يمكن أن يحدث معه عدد لا نهائي من دورات التحميل بأحمال متكررة دون حدوث انهيار.

وأحياناً يسمى هذا الإجهاد بإجهاد حد إلا طاقة أو الإحتمال أو الكلال، ويمكن تحديده مخبرياً بعمل اختبارات على عدد من عينات الإختيار المتماثلة والتي تعرض كل منها لإجهاد معكوس كلياً σ_r مختلف عن العينة الأخرى من تحديد عدد الدورات N اللازمة لإحداث الإنهيار في كل عينة ورسم العلاقة بين(σ و N) ثم تحديد إجهاد حد الإحتمال σ_e كما هو مبين بالشكل(3- 4).

منحنى مقاومة التعب:

يمثل هذا المنحنى العلاقة بين كل من الإجهاد الأقصى σ_{max} والإجهاد الأدنى σ_{min} والإجهاد المتوسط σ_m لأي دورة من دورات التحميل كما بالشكل (4- 4) ويرسم هذا المنحنى بتوقيع قيمة إجهاد حد الإحتمال σ_e على الإحداثي الرأسي لتحديد النقطتين A، 'A ثم توقع نقطة B على خط يميل مع المحور

الأفقي 45° وبحيث يكون ارتفاعها عن المحور الأفقي σ_u ثم يوقع لكل إجهاد متوسط قيمة σ_{max} وقيمة σ_{min} فيتكون المنحنى ’ABA ويسمى منحنى مقاومة التعب، ويلاحظ أن نقطة B تمثل إجهاد ثابت بقيمة.

$$\sigma_m = \sigma_{max.} = \sigma_u$$

أما نقطة A،'A فهما يمثلان حالة إجهاد حد الإحتمال، ونظراً لأنه لا يسمح في التصميم أن تتعدى قيمة الإجهاد إجهاد حد الخضوع يرسم خط أفقي على ارتفاع قدرة σ_y ويوازي المحور الأفقي فيقابل منحنى σ_{max} في نقطة E ومنها يرسم خط رأسي يقطع منحنى σ_{min} في نقطة F ويكون المنحنى ’AEDFA هو منحنى مقاومة التعب التصميمي.

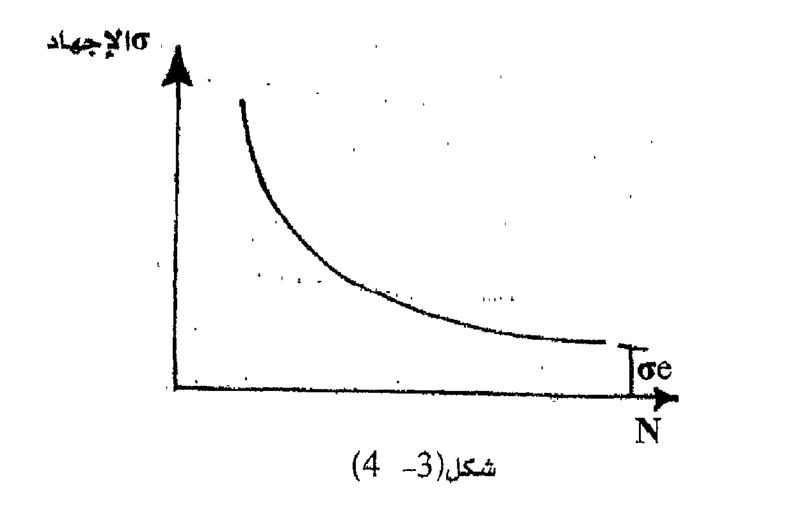
ويستعمل هذا المنحنى بعد تصميم الأجزاء المعرضة لإجهادات متكررة لمعرفة احتمال حدوث كسر نتيجة تعب المعادن من عدمه كالآتي:

يرسم خط رأسي yz عند قيمة الإجهاد المتوسط σ_m ويحدد نقطتي تقاطعه مع المنحنى البياني للإجهاد الأقصى والإجهاد الأدنى التي يمكن إجهاد وأدنى إجهاد متكرر للجزء الذي تم تصميمه لتحمل إجهادات التعب على الخط yz كما هو مبين بالشكل(4-4) وكانت النقطتين n وm أو أي منهما خارج هذا المنحنى لأي دورة إجهاد متكررة خارج هذا المنحنى فهناك احتمال حدوث انهيار بالتعب.

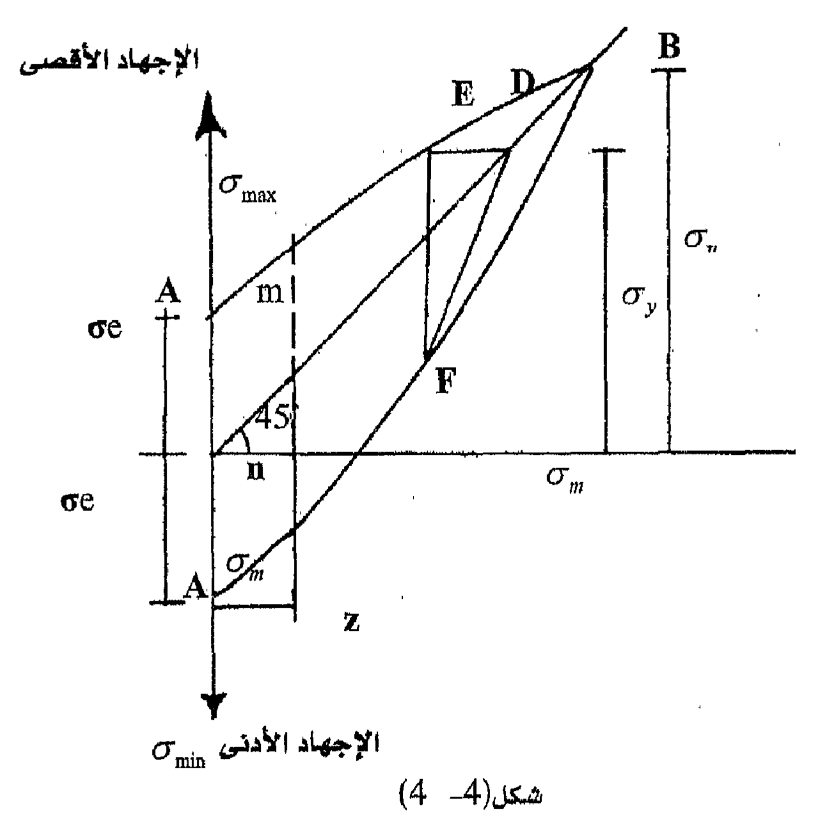
يمكن رسم هذا المنحنى بطريقة مبسطة وتقريبية باستعمال خواص المعدن σ_y. σ_e and σ_u كما هو متبع في منحنى سميث لمقاومة التعب.

منحنى سميث لمقاومة التعب:

يمكن رسم منحنى سميث لمقاومة التعب باتباع الخطوات الآتية:



شكل(3- 4)



شكل(4- 4)

1) نحدد للمعدن المستعمل قيم أقصى إجهاد σ_u وإجهاد الخضوع σ_y وإجهاد حد الإحتمال σ_e.

2) نأخذ محور رأسي يمثل أقصى إجهاد σ_m وأدنى إجهاد σ_{min} ومحور أفقي يحدد الإجهاد المتوسط σ_m ثم نرسم خط OB يعمل 45° مع الأفقي ونحدد نقطتي A' وA بحيث $\sigma_e = OA' = OA$.

3) نصل AB وB' A' ونرسم من نقطة A المستقيم AJ الذي يعمل مع الخط الأفقي زاوية 45° ثم منتصف الزاوية بين الخط AJ والخط AB بالخط المستقيم AE الذي يقطع الخط الأفقي الذي يرتفع عن محور الإجهاد المتوسط بقيمة σ_y في نقطة E ثم تحدد نقطة D' كما على الرسم.

4) نرسم من E خط رأسي ونحدد نقطتي I, F بحيث $IF = EI$ فيمثل الشكل AEDFA' منحنى سميث لمقاومة التعب.

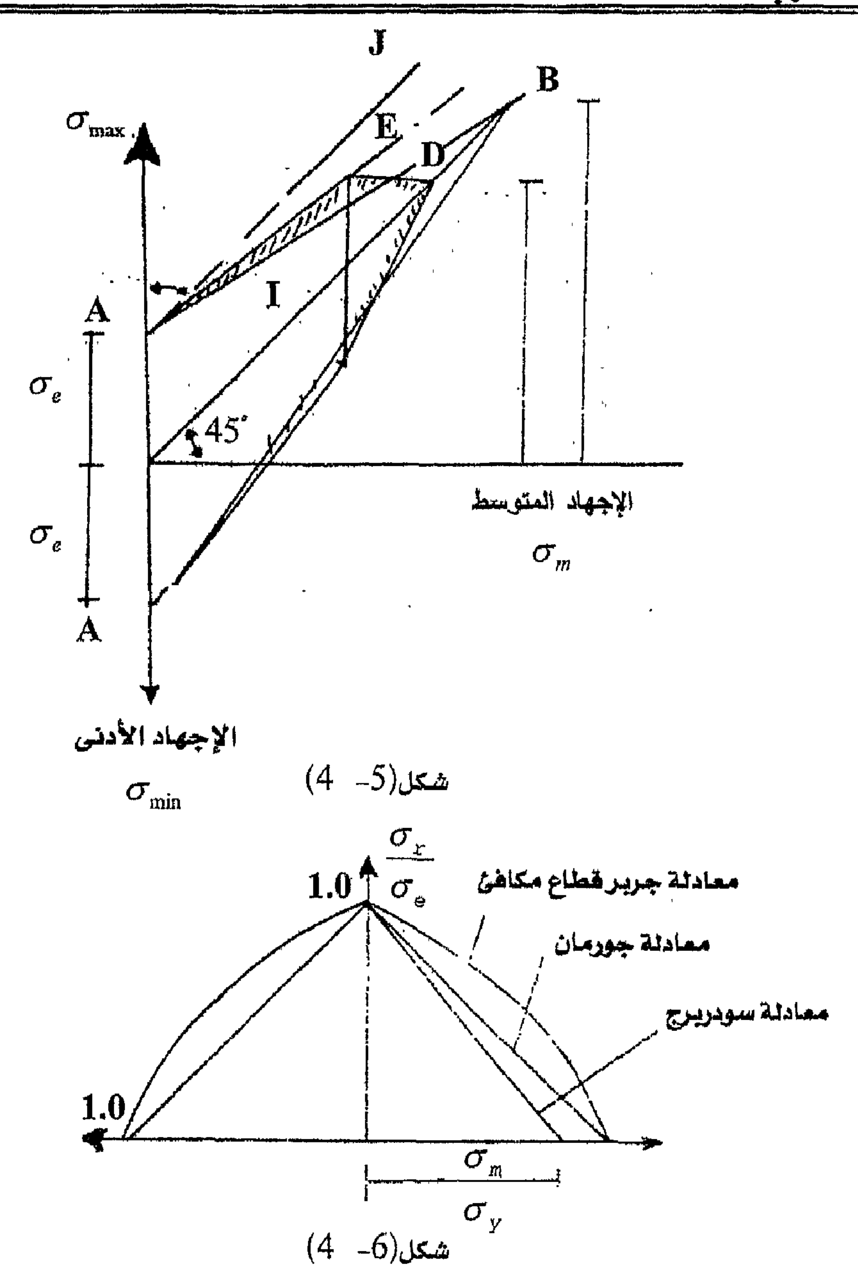
وفي بعض الأحيان يرسم هذا المنحنى باستعمال القيم.

$$\frac{\sigma_e}{N}, \quad \frac{\sigma_y}{N}, \quad \frac{\sigma_u}{N}$$

وهي إجهادات التشغيل للمعدن بدلاً من القيم:

$\sigma_e, \sigma_y, \sigma_u$

(حيث N معامل الأمان للمعدن المستعمل).



شكل(5- 4)

شكل(6- 4)

المعادلات الوضعية لمنحنى مقاومة التعب:

Empirical Formula for Fatigue Strength Curve:

لقد أثبتت التجارب والأبحاث العديدة الإختلاف في نتائجها المختلفة عند دراسة تأثير الإجهاد المتوسط σ_m على مقاومة التعب ولذلك وضعت مجموعة من المعادلات الوضعية المختلفة لإنهيار التعب تربط بين الإجهاد المتوسط σ_m والإجهاد المتغير σ_r كالآتي، وكما هو مبين بالشكل(6- 4).

1. معادلة جربر للقطع المكافئ: Gerber's Equation

وفيها تكون العلاقة بين $\frac{\sigma_m}{\sigma_u}$, $\frac{\sigma_r}{\sigma_e}$ على شكل قطع مكافئ كما في الشكل(6- 4).

وتكون معادلة هذا المقطع المكافئ كالآتي:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} + (\frac{\sigma_m}{\sigma_u})^2 = 1.0$$

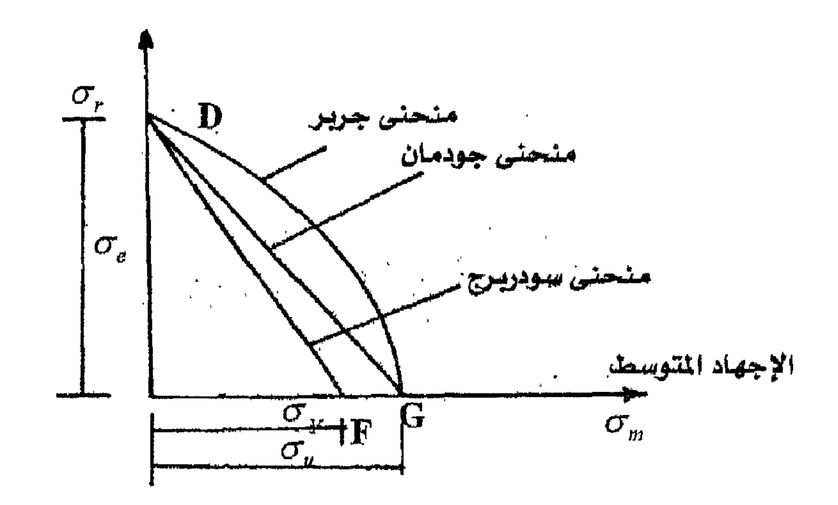
2. معادلة جودمان: Modified Goodaman's Equation

وفيها تكون العلاقة بين $\frac{\sigma_m}{\sigma_u}$, $\frac{\sigma_r}{\sigma_e}$ عبارة عن خط مستقيم كالآتي:

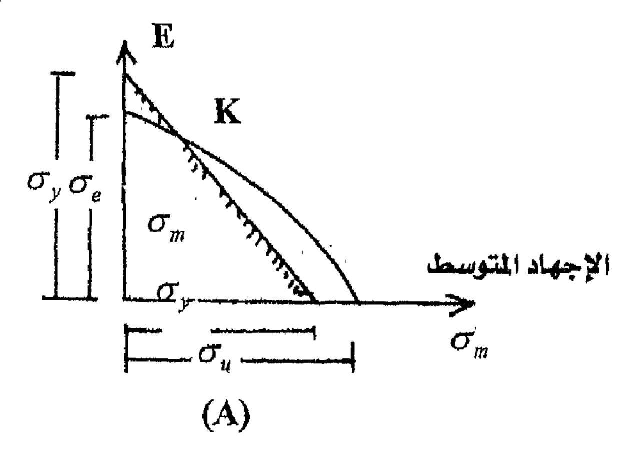
$$\frac{\sigma_r}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1.0$$

3. معادلة سودربرج: Soderberg's Equation

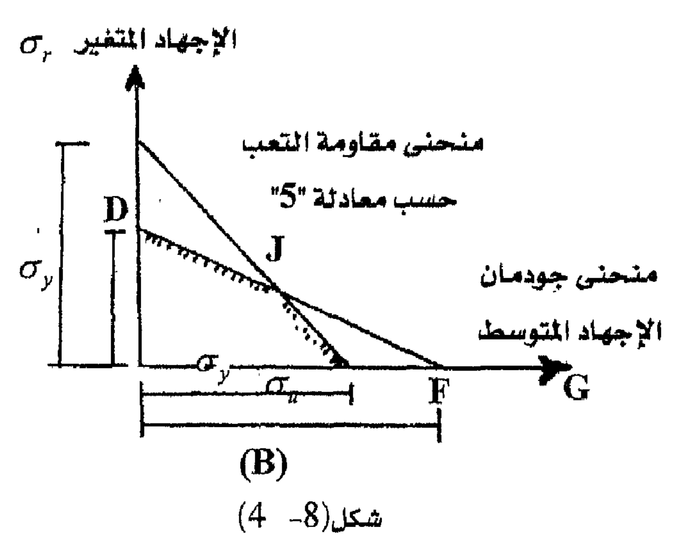
وفيها تكون العلاقة بين $\frac{\sigma_m}{\sigma_y}$; $\frac{\sigma_r}{\sigma_e}$ عبارة عن خط مستقيم أيضاً كالآتي:



شكل(7- 4)



(A)



(B)

شكل(8- 4)

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_e}+\frac{\sigma_m}{\sigma y}=1.0$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_e}+K\frac{\sigma_m}{\sigma_u}=1.0$$

$$\text{Where } K = \frac{\sigma_y}{\sigma_y}$$

وفي هذه المعادلات الثلاث إذا علم خواص المعدن σ_y,σ_u,σ_e فإنه يمكن بمعلومية الإجهاد المتوسط σ_m حساب الإجهاد المتغير σ_r ثم حساب الإجهاد الأقصى والإجهاد الأدنى كما يأتي:

$$\sigma_{max.} = \sigma_m + \sigma_r$$

$$\sigma_{min.} = \sigma_m - \sigma_r$$

ويمكن تمثيل العلاقة بين الإجهاد المتغير σ_r والإجهاد المتوسط σ_m كما هو مبين بالشكل(7- 4) ويسمى الخط DG وDF بالمثلث التصميمي للكلال، ويجب من الوجهة التصميمية ألا يزيد أكبر كيمة للإجهاد تتعرض لها المادة عن σ_y:

$$\text{i. e. } \sigma_{max.} = \sigma_m + \sigma_r \leq \sigma_y$$

$$\sigma_m = \sigma_r \leq \sigma_y$$

وهذه العلاقة عبارة عن خط مستقيم ومنحنى التعب التصميمي لجربر إلى الشكل DKF كما في شكل(8a- 4) ويتحول المثلث التصميمي للكلال DG إلى المنحنى التصميمي لمقاومة التعب DJF كما هو مبين بالشكل(8b- 4).

- حد الإحتمال(Endurance limit).

يمكن إيجاد حدّ الإحتمال لعينة الإختبار الدوارة من العلاقة التالية:

$$S'_e = \begin{cases} 0.504\ S_{ut} & S_{ut} \leq 200\ \text{Ksi}(1400\text{Mpa}) \\ 100\ \text{Kpsi} & S_{ut} > 200\ \text{Ksi} \\ 700\ \text{Mpa} & S_{ut} > 1400\ \text{MPa} \end{cases}$$

حيث أنّ S_{ut}: أقل مقاومة شد للعينة.

ونحن بحاجة إلى إيجاد قيمة S_e وهي تمثل حدّ الإحتمال لأي عضو مصنوع من مادة مشابهة وتؤثر عليه قوى مختلفة.

- مقاومة التعب(Fatigue Strength):

1. التعب الناتج عن عدد دورات قليلة(Low- Cycle Fatigue):

ويظهر هذا النوع من التعب في عدد دورات تتراوح بين N=1 إلى N=1000 دورة، وضمن هذه الحدود تكون مقاومة التعب S_f أقل من أقل مقاومة شد S_{ut}.

2. التعب الناتج عن عدد دورات كبيرة(High – Cycle Fatigue):

ويظهر هذا النوع من التعب في عدد دورات تتراوح بين 10^3 إلى عدد دورات 10^6 أو ما يزيد عن ذلك.

ويمكن إنشاء معادلة تربط بين S-N(عدد الدورات، المقاومة) كما يلي:

$$S_f = aN^b$$

وعند عدد دورات ($N = 10^3$):

$$S_{ut} f\,(S_f)_{10^3} = a(10^3)^b = a(10)^{3b}$$

ولإيجاد قيمة العامل f :

$$f = \frac{a}{S_{ut}}(10)^{3b}$$

هذه القيمة ليست ثابتة، وفي التعب الناتج عن عدد دورات كبيرة بإجهاد أقل من حد التناسب، نستخدم علاقة تربط بين الإجهاد المعكوس σ_r ومعامل مقاومة التعب σ_f كما يلي:

$$\sigma_v = \sigma'_f (2N)^b$$

ولإيجاد قيمة الأس b:

$$b = -\frac{\log(\sigma'_f / S_e)}{\log 2N_e}$$

وبالتالي تصبح قيمة المعامل f :

$$f = \frac{2^b \sigma'_f}{S_{ut}}\left(\frac{\sigma'_f}{S_e}\right)$$

وعليه تصبح قيمة معامل مقاومة التعب σ'_f كما يلي:

$$\sigma'_f = S_{ut} + 58.5 ksi$$

وفي حالة التعب الناتج عن عدد دورات كبيرة:

$= aN^b f S$

يمكن إيجاد قيمة a وb كما يلي:

$$a = \left(\frac{0.9S_{ut}}{S_e}\right)^2$$

$$b = -\frac{1}{3}\log\frac{0.9S_{ut}}{S_e}$$

وعليه تكون العلاقة بين عدد دورات الإحتمال(life) والإجهاد المعكوس كما يلي:

$$N = \left(\frac{\sigma_r}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$$

مثال: فولاذ له أقل مقاومة شد مقدارها 95Ksi واقل مقاومة خضوع مقدارها 74 Ksi، وجد ما يلي:

1. حد الإحتمال لعينة الإختبار الدوارة.
2. مقاومة التعب المناظرة لعدد دورات مقدراها 10^4.
3. عدد دورات الإحتمال(Life) المتوقعة نتيجة لوجود إجهاد معكوس مقداره 55Ksi.

الحل:

(a

$_e = 0.5\ S_{ut} = 0.5(95) = 47.5\text{Ksi}\, S'$

حيث أنّ حد الإحتمال لعينة الإختبار الدوارة هو 47.5 Ksi.

b) لإيجاد مقاومة التعب:

$$S_f = a.\, N^b$$

نجد مقدار a وb من العلاقات التالية:

$$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{S_e} = \frac{[0.9(95)]^2}{47.5} = 153.9Ksi$$

$$b = -\frac{1}{3}\log\frac{0.9S_{ut}}{S_e} = -\frac{1}{3}Log\frac{0.9(95)}{47.5}$$

$$= -0.0851$$

وعليه يمكن إجهاد مقاومة التعب:

$$S_f = 153.9(10^4)^{-0.0851} = 70.3\ Ksi$$

C) عدد دورات الإحتمال:

$$\sigma_a = 55Ksi$$

$$N = \left(\frac{\sigma_r}{a}\right)^{1/b} = \left(\frac{55}{153.9}\right)^{\frac{-1}{0.0851}} = 1.78(10^5)cycle$$

أي أنّ عدد دورات الإحتمال تساوي $1.78 \times (10^5)$ دورة.

- **عوامل تعديل حد الإحتمال:**

إنّ عينة الإختبار الدوارة والمستخدمة لإيجاد حد الإحتمال يجب تحضيرها بشكل جيّد، وليس من الحقيقي إستخدام النتائج المخبرية للتعامل مع الأعضاء الميكانيكية والماكنات المستخدمة على أرض الواقع.

ومن هنا برزت فكرة عوامل تعديل حد الإحتمال من أجل الوصول للقيمة الحقيقية لحد الإحتمال.

ويتم التعبير عن حد الإحتمال كما يلي:

$S_e = K_a K_b K_d K_e S'_e$

حيث:

S_e، حد الإحتمال للجزء الميكانيكي.

S'_e: حد الإحتمال لعينة الإختبار.

k_a: عامل السطح.

k_b: عامل الحجم.

k_c: عامل الحِمل.

K_d: عامل درجة الحرارة.

k_e: عامل التأثيرات المتنوّعة.

- عامل السطح K_a.

يجب أن أن يكون سطح العينة ناعم ومصقول بشكل جيد، لذا فإنّ عامل السطح يعتمد بشكل كبير على درجة نعومة السطح، والجدول(1- 4) يبيّن العوامل(b وa) اللازمة لإيجاد K_a.

جدول(1- 4)

الأس b	(العامل a) MPa	ksi	(إنهاء السطح) Finish Surface	
-0.085	1.58	1.34	Ground	(مجلوخ، مشحوذ)
-0.265	4.51	2.70	Machined or cold-drawn	(مشغّل، مسحوب على البارد)
-0.718	57.7	14.4	Hot-rolled	(مدرفل على الساخن)
-0.995	272	39.9	As forged	(بدون تشغيل)

ومنه يمكن إيجاد عامل السطح كما يلي:

$$K_a = aS^b_{sut}$$

حيث:

S_{ut}: أقل مقاومة شد للمادة.

a وb: عوامل يمكن إيجادها من الجدول.

- عامل الحجم(K_b):

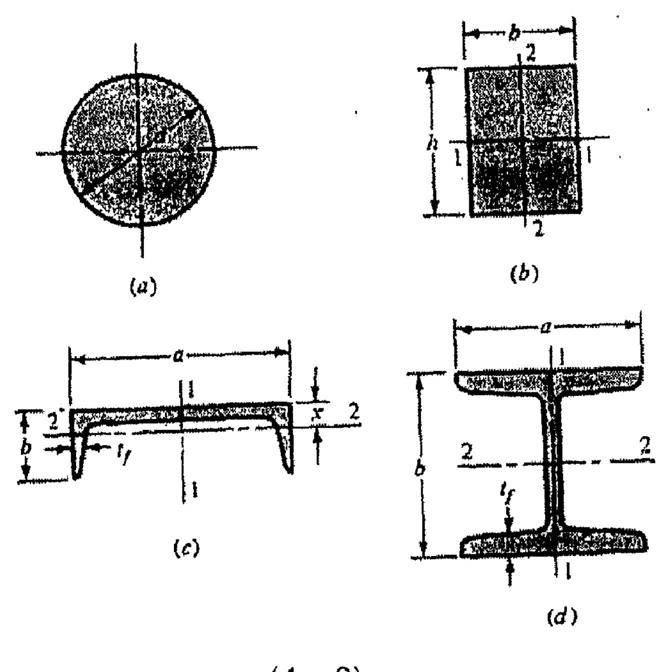
يمكن التعبير عن عامل الحجم K_b لحالتي الثني واللّي كما يلي:

$$K_b = \begin{cases} \left(\dfrac{d}{0.3}\right)^{-0.1133} in & 0.11 \le d \le 2in \\ \left(\dfrac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} mm & 2.79 \le d \le 51mm \end{cases}$$

ولأحجام كبيرة تتراوح قيمة K_b للحالتي الثني واللّي بين 0.6 و 075 وللتحميل المحوري لا يوجد تأثير للحجم وعليه تكون قيمة $K_b = 1$.

حيث أنّ d: قطر العضو.

- وفي حالة المقاطع غير الدائرية تستخدم فكرة القُطر الفعال (d_e(effective diameter.



شكل(9- 4)

في الشكل(9- 4) والذي يمثل بعض المقاطع غير الدائرية كما في a و b و c و d.

بالنسبة لعينة مجوفة دوّارة قطرها الخارجي d يمكن إيجاد القطر الفعال كما يلي:

$$d_e = 0.312d$$

ولعينة مجوّفة أو مصمتة غير دوارة قطرها الخارجي D يمكن إيجاد القطر الفعال كما يلي:

$$d_e = 0.37D$$

أمّا لعينة مستطيـ ـته(h × b) كما في شكل(b 9- 4) يمكن إيجاد القطر الفعال كما يلي:

$$(hb)^{1/2}\, d_e = 0.808$$

- عامل الحمل k_c:

ويتم التعبير عنه بالمعادلات التالية:

$\le 220\,ksi \quad (1520_{mpa})\; S_{ut}$ (تحميل محوري) $= 0.923\, K_c$

$\succ 220Ksi(1520_{MPa})\; S_{ut}$ (تحميل محوري) 1

1. (حمل ثني)

0.577 (حمل قص وليّ)

- عامل درجة الحرارة k_d:

عند إنخفاض درجة الحرارة التشغيلية أقل من درجة حرارة الغرفة هناك إحتمال لحدوث كسر قصيف، وعند إرتفاع درجة الحرارة أعلى من درجة حرارة الغرفة فيجب الإنتباه لخضوع العينة حيث أنّ مقاومة الخضوع تنخفض بشكل سريع وحاد بارتفاع الحرارة.

باستخدام جدول(2- 4)، من خلال النسبة $k_d = S_T / S_{RT}$

حيث:

S_T: مقاومة الفولاذ عند درجة الحرارة التشغيلية.

S_{RT}، مقاومة الفولاذ عند درجة حرارة الغرفة.

جدول(2- 4)

CTEMPERATURE,	$S_T/S_{RT} = K_d$	TEMPERATURE, F'	$S_T/S_{RT} = k_d$
20	1.000	70	1.000
50	1.008	100	1.010
100	1.020	200	1.020
150	1.024	300	1.025
200	1.018	400	1.020
250	0.995	500	1.000
300	0.963	600	0.975
350	0.927	700	0.927
400	0.872	800	0.922
450	0.797	900	0.840
500	0.698	1000	0.766
550	0.567	1100	0.670
600			0.546

- **عامل التأثيرات المتنوعة K_e:**

ويشتمل هذا العامل على بقية التأثيرات الأخرى التي تؤثر على حد الإحتمال مثل الإجهادات المتخلّفة، وعمليات التصنيع المختلفة.

ويمكن إيجاد عام التأثيرات المتنوعة من العلاقة التالية:

$$K_e = \frac{1}{K_f}$$

ويرمز له أيضاً بعامل إختزال مقاومة التعب(Fatigue- strength- reduction factor).

أمّا K_f فيسمى عامل تركيز الإجهاد(Stress Concentration factor).

أمثلة محلولة:

1) قضيب من الفولاذ المسحوب على البارد $S_{ut} = 56Ksi$ وقطره $1\ in$ إحسب ما يلي:

أ. حد الإحتمال.

ب. حد الإحتمال لعزم إنحناء معكوس بدون دوران.

ج. مقاومة التعب على عدد دورات $N = 70\times10^3$ عند درجة حرارة تشغيلية مقدارها 550F.

الحل:

أ. لإيجاد حد الإحتمال:

$S_{ut} = 56Ksi < 200Ksi$

$e = 0.504\ S_{ut} = 0.504(56)\ 'S$

$= 28.2\ K$

نجد قيمة K_a عامل السطح باستخدام جدول(1- 4) حيث $a = 2.7$ و $b = 0.265$- وعليه:

$$K_a = aS_{ut}^b = 2.7(56)^{-0.265}$$

$$= 0.929$$

ثمّ نجد عامل الحجم K_b من العلاقة التالية:

$$K_b = K_d\left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.1133} = \left(\frac{1}{0.3}\right)^{-0.1133} = 0.87$$

كذلك الأمر:

$K_c = K_d = K_e = 1$

وعليه يمكن إيجاد قيمة حد الإحتمال كما يلي:

$S'_e = 0.929 \times 0.872 \times 28.2 = 22.8 Ksi$

ب. لإيجاد حد الإحتمال لعزم إنحناء بدون دوران:

يجب إيجاد القطرالمكافئ كما يأتي:

$d_e = 0.37 D = 0.37(1) = 0.37 \text{ in}$

وبالتالي نجد عامل الحجم:

$$K_b = \left(\frac{d_e}{0.3}\right)^{-0.1133} = \left(\frac{0.37}{0.3}\right)^{-0.1133} = 0.977$$

وعليه يكون حد الإحتمال لعينة غير دوارة معرض لعزم إنحناء معكوس:

$S_e = 0.929 \times 0.977 \times 28.2 = 25.6 Ksi$

ملاحظة:

إنّ وجود عزم إنحناء معكوس على عينة غير دوارة يعني أنّ إتجاه العزم يتغير(- أو +).

ج. لإيجاد مقاومة التعب عند درجة حرارة 550F:

نستخدم جدول(2- 4) لإيجاد قيمة $\frac{S_T}{S_{RT}}$

$$= 0.979 \frac{S_T}{S_{RT}}$$

$$S_{ut} = 0.979(56) = 54.8 \text{ Ksi} \frac{S_T}{S_{RT}} \Rightarrow S_{utT} =$$

$6 \text{ Ksi}.S_{\acute{e}} = 0.504\ S_{utT} = 0.504(54.8) = 27$

$S_e = 0.929 \times 0.872 \times 27.6 = 22.4 \text{ Ksi}$

$$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{S_e} = \left[\frac{0.9(54.8)}{22.4}\right]^2 = 108.6$$

$$b = -\frac{1}{3}\log\frac{0.9S_{ut}}{S_e} = -\frac{1}{3}\log\frac{0.9(54.8)}{22.4} = -0.1143$$

$$= aN^b = 108.6(70 \times 10^3)^{-0.1143} = 30.3 \text{ Ksi}_f\ S$$

وعليه يمكن إيجاد إجهاد عزم الإنحناء σ:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{700 \times 0.016}{\frac{1}{4}\pi(0.016)^4} = 217.6MPa$$

وبما أنّ هذا العزم أكبر من قيمة حد الإحتمال فإنّ هذاالمحور له عمر محدود يمكن إيجادخ كما يلي:

$$a = \left[\frac{0.9S_{ut}}{S_e}\right]^2 = \left[\frac{0.9 \times 690}{154.3}\right]^2 = 2499$$

$$\frac{1}{3}\log\frac{0.9(690)}{154.3} = -0.2016\ b = -$$

وبالتالي فإنّ عُمر هذا المحور يُحدد كما يلي:

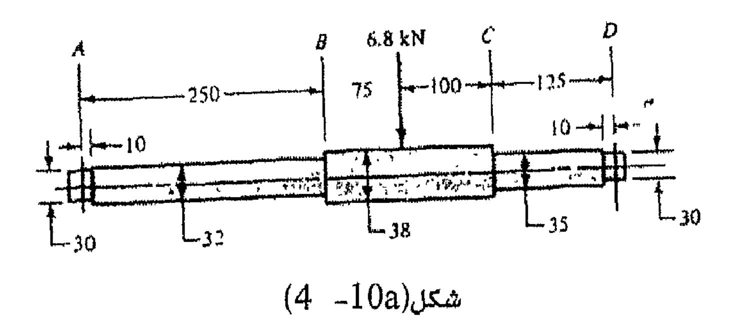
$$N = \left(\frac{\sigma_r}{a}\right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{217.5}{2499}\right)^{\left(\frac{1}{-0.2016}\right)}$$

10^3 Cycle×= 182

اي أنّ عدد دورات الإحتمال(عُمر المحور) يُحدد بـ 182×10^3 دورة.

2) في المحور الدوراني التالي المسحوب على البارد بمحملين عند A وB والمُحمّل بقوة F وبدون دوران، أوجد عمر هذا المحور(عدد دورات الإحتمال):

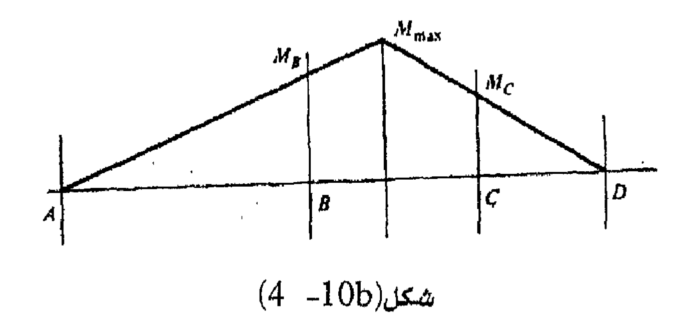
جميع الأبعاد بوحدة mm، S_{ut}= 690 Mpa، S_y= 580Mpa، K_f= 1.53



شكل(4 -10a)

الحل:

من مخطط العزم للمحور في شكل(4 -10b) من المحتمل حدوث الإنهيار عند النقطة B أكثر من النقطة c ونقطة أقصى عزم، حيث أنّ النقطة B لها أصغر مقطع مساحة وعزم أعلى وعامل تركيز إجهاد أعلى أيضا من النقطة c، وحيث أنّ منطقة أقصى عزم لها أكبر مقطع مساحة ولا تحتوي على تركيز إجهاد.



شكل(4 -10b)

بما أنّ $S_{ut} = 690 < 1400$

$$S'_e = 0.504(690)$$

$$= 347.8 \text{ Mpa}$$

ومن جدول(1- 4) نجد قيمة a و b:

A= 4.51, b= -0.265

$$K_a = aS^b_{ut} = 4.51(690)^{-0.265} = 0.798$$

ثمّ نجد عامل الحجم K_b:

$$K_b = \left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.1133} = \left(\frac{32}{0.3}\right)^{-0.1133} = 0.85$$

أما قيمة عامل التأثيرات المتنوعة k_e:

$$k_e = \frac{1}{k_f} = \frac{1}{1.53} = 0.654$$

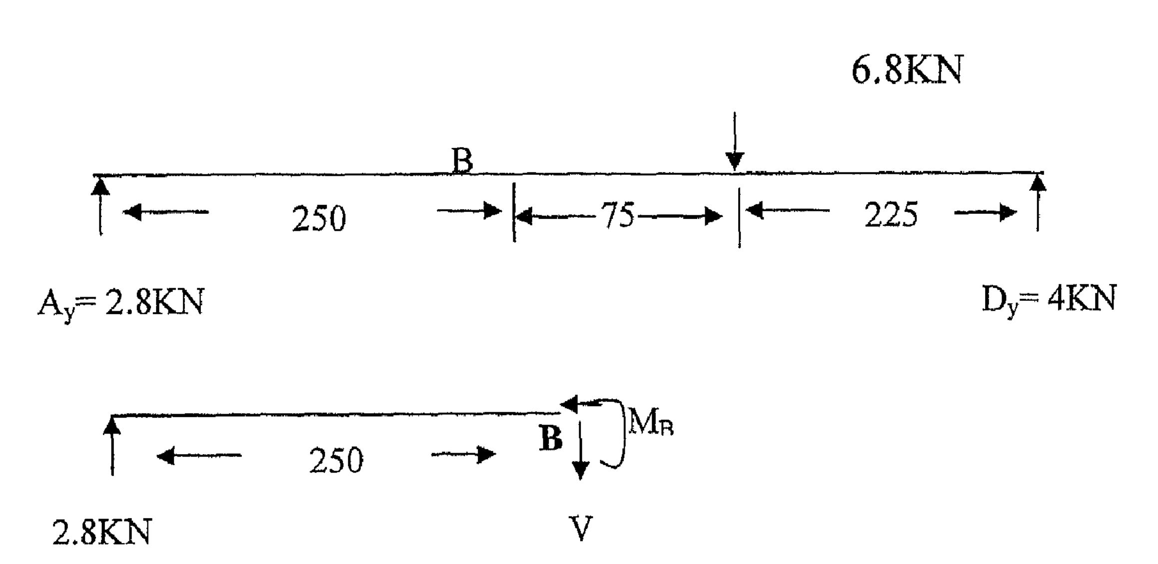
أما ما تبقى من عوامل تعديل حد الإحتمال فتأخذ قيمة الواحد صحيح.

$$K_c = K_d = 1$$

وعليه تكون قيمة حد الإحتمال:

$$347.8 = 154.3Mpa\times 0.654\times 0.85\times S_e= 0.798$$

أمّا قيمة العزم عند النقطة(M_B) يمكن إيجادها كما يلي:



$$0.25 = 0\times\sum M = M_B - 2.8$$

$$M_B = 0.7\ KN.m = 700N.m$$

العوامل التي تؤثر على مقاومة التعب:

يوجد مجموعة من العوامل العديدة التي تؤثر في مقاومة التعب للمعادن مثل طريقة التصنيع والظروف المحيطة بالمادة عند الإستعمال وعوامل ومؤثرات التصميم ونوع وشكل التركيب الكيميائي للمادة، وفيم يلي شرح تفصيلي للعوامل المختلفة المؤثرة على مقاومة التعب.

1. ظروف التاثير بالإجهادات: Condition Of Stress Application

ا. **تاثير السرعة: Effect of Speed.**

لقد وُجد بعد إجراء الإختبارات على الصلب الطري والحديد والنحاس عدم تأثر مقاومة التعب بتغير سرعة الإجهاد حتى سرعة 7000rpm كما وجد أن إجهاد حد الإحتمال σ_e يرتفع قليلاً عند السرعات العالية.

وقد يرجع سبب ذلك عدم تمكن الإجهاد المؤثر من إحداث تاثيره الكامل في تغيير شكل قطعة الإختبار وإمكان إتلافها في مدة تأثير الإجهاد القصيرة، ولقد وُجد من نتائج اختبارات على الصلب نيكل – كروم بسرعات تتراوح بين 3000-15000rpm إن إجهاد حد الإحتمال تقل قيمته بزيادة السرعة إذا كان مدى الإجهاد كبيراً نتيجة التخلفية الميكانيكية وارتفاع درجة حرارة العينة.

ب. تأثير التغيرات اللحظية للإجهادات:

Momentary Variation of Stress(Overstrissing and Understressing)

إن ظروف تشغيل أجزاء الماكينات قد تؤدي إلى تغير الأحمال المؤثرة عليها مما يسبب تعرض هذه الأجزاء إلى إجهادات مختلفة قد تزيد أو تقل عن إجهاد حد الإحتمال ولمدة طويلة أو قصيرة من الزمن، ولقد أثبتت نتائج اختبارات أنه إذا تعرض المعدن لإجهادات متغيرة أكبر كثيراً عن إجهاد حد الإحتمال، وإذا تعرض المعدن لإجهاد متغير أعلى قليلاً من إجهاد حد الإحتمال لعدد كبير من الدورات فإن ذلك يقلل من قيمة إجهاد حد الإحتمال أما إذا حدث ذلك لعدد صغير من الدورات فإن الإجهاد المتغير لإجهاد أقل قليلاً من إجهاد حد الإحتمال لعدد كبير من الدورات فإن ذلك يزيد من قيمة إجهاد حد الإحتمال.

ويمكن تفسير ذلك إلى أن حد المرونة للمادة يرتفع بتأثير الإجهاد المتغير ويزداد ذلك في حالة المواد المطيلة عن حالة المواد القصفة وقد تصل 30% من القيمة الأصلية، كما أن الصلب عالي المقاومة أكثر تأثراً بالإجهاد الزائد عن الصلب الطري.

ج. تأثير الإجهادات الداخلية المتخلفة. Internal Residual Stresses

تسبب الإجهادات الداخلية المتخلفة من المعالجة الميكانيكية أو المعالجة الحرارية انهيار مفاجئ بجزء المنشأ أو الماكينة نظراً لعدم معرفة قيمة هذا الإجهاد وما إذا كان إجهاد شد أو إجهاد ضغط، ويكون سبب هذا الإنهيار هو اتحاد الإجهاد الداخلي مع قيمة الإجهاد الناتج من الأحمال الخارجية فيزيد من قيمة الإجهاد المعرض له المعدن فيحدث الإنهيار المفاجئ بعد فترة تشغيل قصيرة، ويمكن تقليل تاثير المعالجة الحرارية بمعالجة الصلب بعد التصنيع بالتطبيع المستمر حيث أنه قد وجد أن ذلك يزيد من إجهاد حد الإحتمال بحوالي 20%.

د. تأثير فترات الراحة:(Rest Periods)

لقد أثبتت نتائج التجارب أن فترات الراحة اللحظية لأجزاء الماكينات المعرضة لإجهاد متغير لا تؤثر على إجهاد حد الإحتمال للمعدن إذا كان الإجهاد المؤثر أقل من إجهاد حد المرونة، أما إذا كان الإجهاد المؤثر أعلى من إجهاد حد المرونة فإن فترات الراحة اللحظية تزيد إجهاد حد الإحتمال قليلاً.

ولقد أثبتت التجارب أيضاً أن فترات الراحة داخل زيت في درجة حرارة الجو العادية أو عند 140C تسبب زيادة في إجهاد حد الإحتمال للمعدن.

تأثير أشكال ومقاسات الأجزاء والحزوز والثقوب ومنحنيات الإتصال:

1) تأثير الشكل:(Shape)

إن وجود التجاويف والثقوب ومنحنيات الإتصال وتغير فجائي في مقطع أجزاء الماكينات يسبب تركيز الإجهادات محلياً مما يساعد على نقص إجهاد حد الإحتمال، ويتوقف هذا النقص في مقاومة التعب حسب تغير شكل منطقة القطر الأصغر وكيفية اتصاله بمنطقة القطر الأكبر.

2) تأثير المقاس:(Size)

إن زيادة المقاس تقلل إجهاد حد الإحتمال في حالة ما إذا كان توزيع الإجهادات على المقطع غير متساوي. فمثلاً في حالة قطاع دائري أجوف معرض لإجهادات انحناء أو التواء تقل مقاومة التعب بزيادة المقاس بينما لا تتأثر هذه المقاومة إذا تعرض نفس القطاع لإجهاد شد محوري متكرر.

3) تأثير الحز:(Notches)

لقد أثبتت التجارب أن وجود الحزوز يقلل من إجهاد حد الإحتمال ويكون النقص في مقاومة التعب في حالة المواد القصفة أكبر منه في حالة المواد المطيلة، ويمكن تفسير هذا التأثير السيء للحزوز على مقاومة التعب بأن العينات المحزوزة والمعرضة لإجهادات معكوسة لا يوجد وقت كاف لسريان الإجهاد ولا توجد فرص لحدوث التصلد بالإنفعال.

4) تأثير الثقوب:(Holes):

تقلل مقاومة التعب للعينات المثقوبة بمقدار قد يصل حوالي40٪ ولقد وجد أن أقصى تأثير للثقوب عندما يكون النسبة بين قطر الثقب إلى قطر العينة بين 0.25- 0.15 ولقد وجد أن تأثير ثقب مائل على محور العينة أقل من تأثير الثقب المحوري على السطح.

5) تأثير منحنيات الإتصال:

أن منحنيات الإتصال تساعد على تقليل تركز الإجهاد عند التغير في المقطع المتسعرض وكلما كبر نصف قطر منحنى الإتصال، كلما صغر عمل تركيز الإجهاد فتزداد قيمة إجهاد حد الإحتمال.

هـ. تأثير حالة السطح: Surface Condition

إن وجود أي خدوش أو حزوز أو مجرى بالسطح يسبب وجود تركيز للإجهاد ويبدأ عندها شروخ تؤدي إلى انهيار بالتعب كما أنها تسبب نقص إجهاد حد الإحتمال للمعدن عن المعدن ذو السطح المصقول، ولذلك يجب تسوية سطوح أجزاء الماكينات المعرضة لأحمال متكررة جيداً، كما أن المعادن المصلدة بالتغليف تكون لها مقاومة للتعب أكبر من المعادن ذات السطوح الغير مصلدة. كما أن تصلد الصلب بواسطة عملية النتردة باستعمال حامض النيتريك أو عملية الكرينة(وضع كربون على السطح مع استعمال المعالجة الحرارية)يزيد من مقاومة المعدن للتعب.

و. تأثير درجة الحرارة:

كقاعدة عامة تقل مقاومة التعب للمعدن بازدياد درجة الحرارة لمعظم المعادن.

ز. تأثير الصدأ:

تقل مقاومة التعب نتيجة الصدأ- وقد يكون الصدأ قبل التعرض للحمل المتكرر أو أثناء ترعضه للحمل المتكرر وهذا الأخير يؤثر كثيراً على مقاومة المعدن للتعب لتغلغل الصدأ داخل المعدن من خلال الشروخ إلى داخل المعدن، وقد يحدث الصدأ نتيجة الظروف الجوية الرطبة المحيطة به أو وجود المياه العذبة أو المالحة حوله، وتغطيه المعدن بطبقة غطاء تساعد كثيراً على تقليل تأثير الصدأ على خفض مقاومة التعب.

الوحدة الخامسة

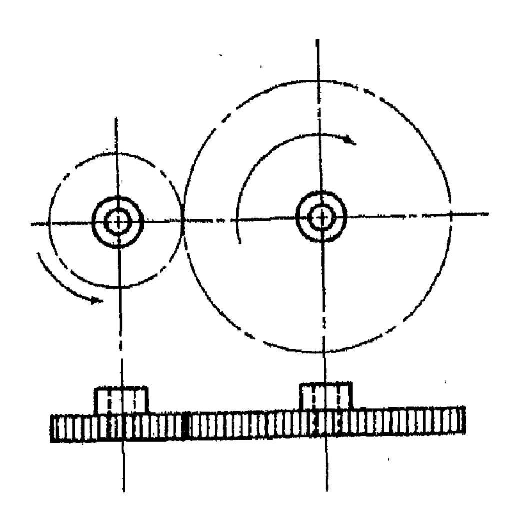
تصميم التروس Design of Gears

تصميم التروس

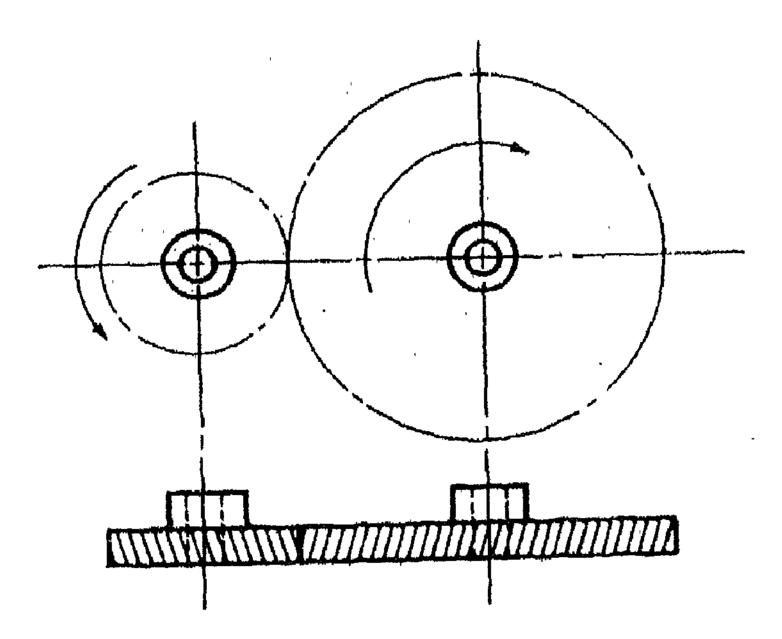
5.1 أنواع التروس:

تصنف التروس إلى أربعة أنواع رئيسية هي:

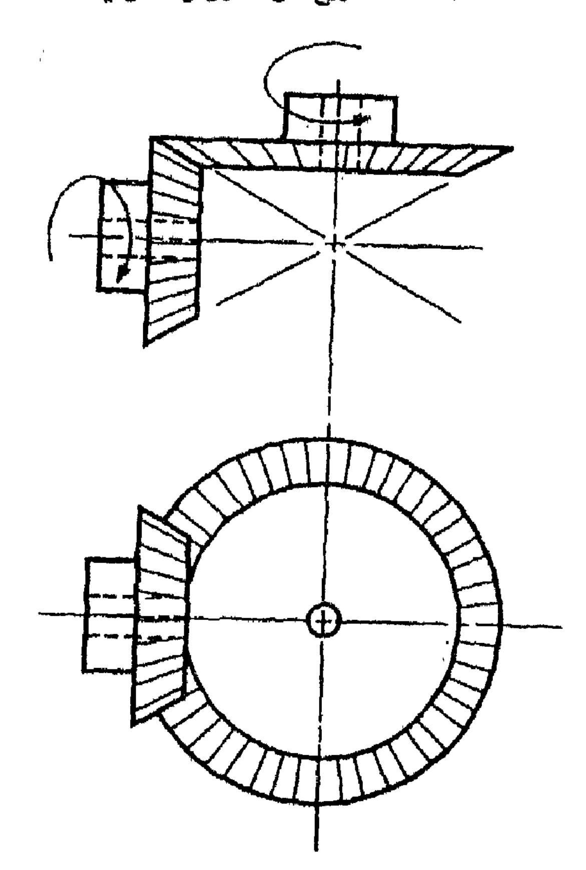
1) التروس العَدِلة أو المتوازية(Spur Gears): ولها أسنان موازية [illegible] الدوران وتستخدم لنقل [illegible] عمود إدارة لآخر موازي له، كما في الشكل (1- 5).
2) التروس الحلزونية(Helical Gears): ولها أسنان مائلة على محور الدوران، ويمكن أن تستخدم في نفس تطبيقات التروس العَدِلة حيث أنها لا تخرج صوتاً مزعجاً كما في التروس العدلة بسبب التعشيق المتدرج بين الأسنان، وبسبب ميل الأسنان تتولد أحمال دفع وعزوم إنحناء والتي لا تظهر في التروس العدلة، كما أنها تستخدم أيضاً في نقل الحركة بين أعمدة غير متوازية، يشير الشكل(2- 5) إلى زوج من التروس الحلزونية.
3) التروس المخروطية(Bevel Gearl): ولها أسنان مخروطية الشكل وتستخدم في نقل الحركة بين الأعمدة المتقاطعة، كما في الشكل(3- 5).



شكل(1- 5) زوج من التروس العدلة

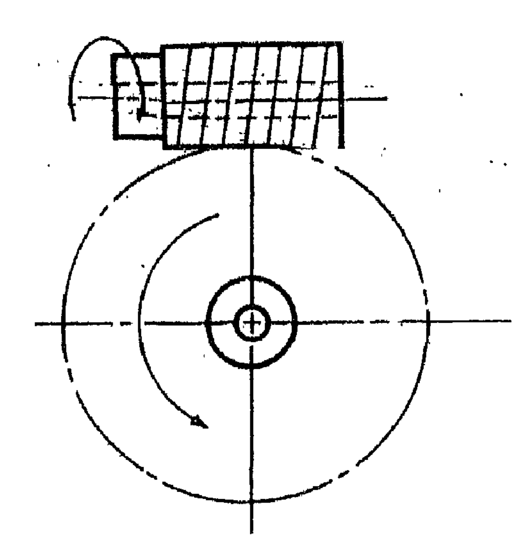


شكل(2- 5) زوج من التروس الدودية



شكل(3-5) زوج من التروس المخروطية

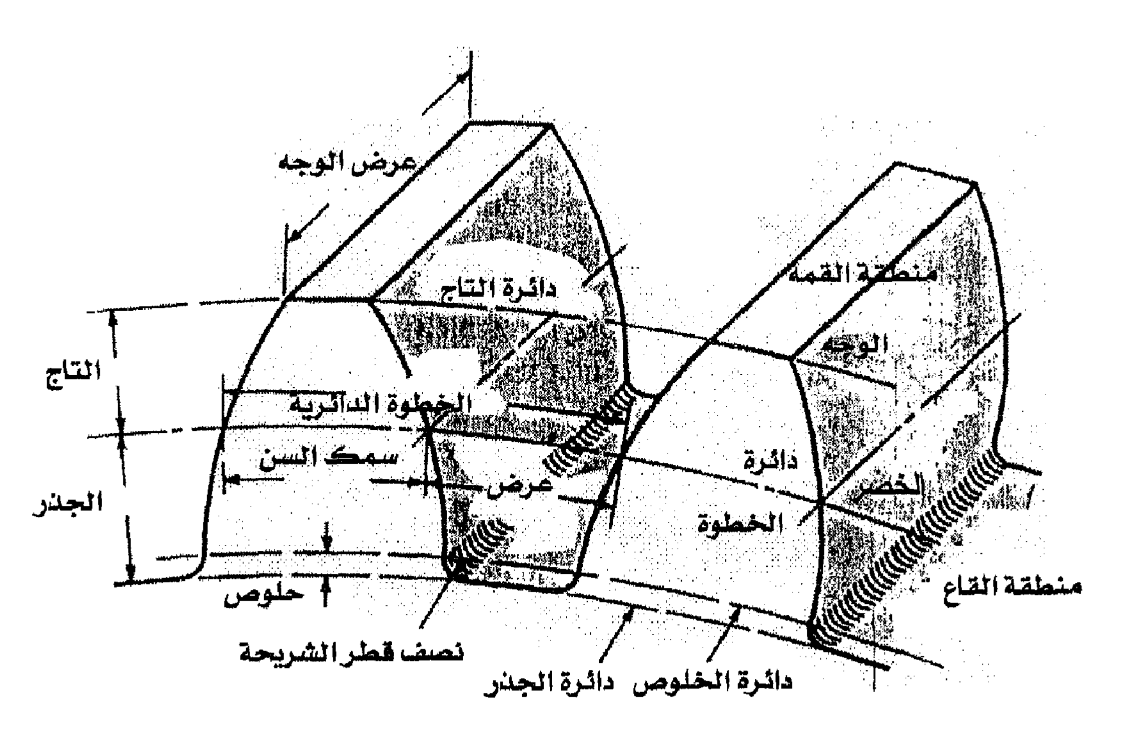
4) التروس الدودية(Worm Gears): ولهما أسنان تشبه أسنان البرغي، ويتحدد إتجاه حركة هذه التروس إعتماداً على قطع أسنان التروس يميني أو يساري، وتستخدم هذه التروس عندما تكون نسبة السرعة بين الأعمدة عالية على سبيل المثال 3 أو أكثر، كما أنها تستخدم في نقل الحركة بين الأعمدة غير المتوازية وغير المتقاطعة، كما في الشكل(4- 5).



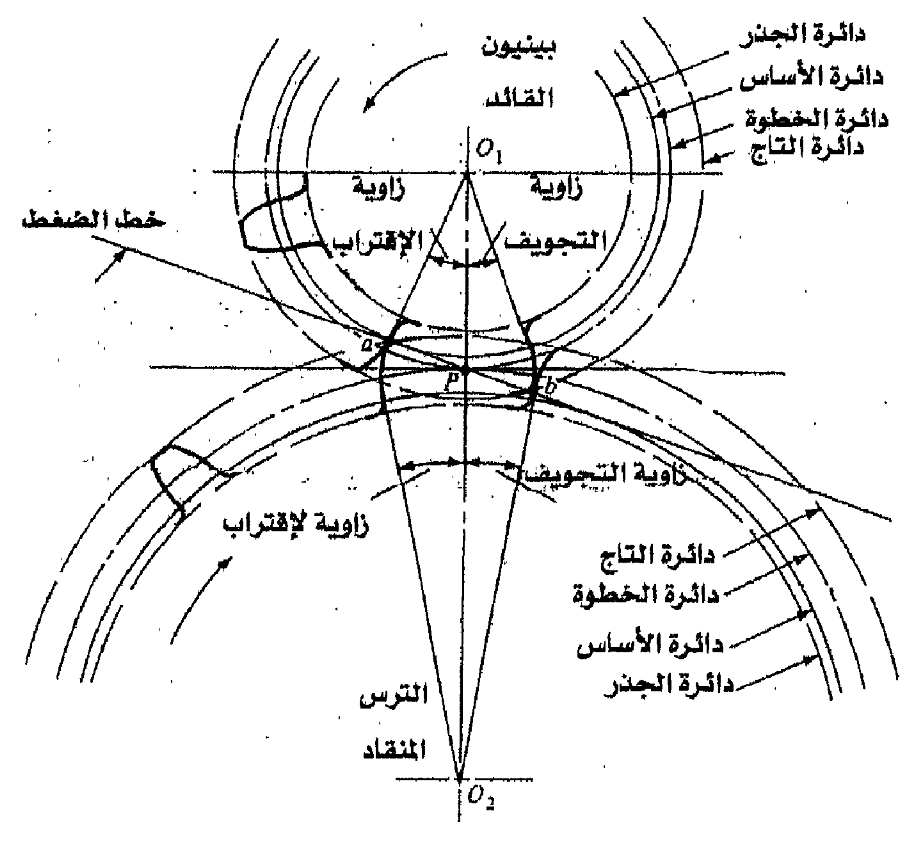
شكل(4- 5) زوج من التروس الدودية

5.2 المصطلحات الفنية(Nomenclature):

سوف يتم إستخدام ترس عدل لدراسته تفصيلياً كما هو موضح في الشكل(5- 5)، والشكل(6- 5).



شكل(5- 5) مصطلحات خاصة بالترس العدل.



شكل(6- 5) زوج من التروس العدلة المعشقة

- دائرة الخطوة:(Pitch circle): هي دائرة نظرية يتم من خلالها نقل الحركة حينما يكون الترسان عجلتين متماثلتين، وتبنى على هذه الدائرة جميع الحسابات، وتكون دائرتا الخطوة لترسين معشقين في حالة تماس مع بعضهما، الترس الأصغر يسمى بينيون(Pinion) والأكبر يسمى ترس(Gear).
- قطر دائرة الخطة(Pitch circle diameter): هو قطر القرص الذي ينقل بالإحتكاك نفس نسبة السرعة التي ينقلها الترس، ويعرف الترس عادة بقطر دائرة الخطوة ويُدعى أيضاً بقطر الخطوة(Pitch diameter).
- زاوية الضغط(Pressure angle): هي الزاوية المحصورة بين المستقيم العمودي على سني الترسين المعشقين عند نقطة التلامس والمستقيم المماس عند نقطة الخطوة ويرمز لها بالرمز ϕ، وزاوية الضغط القياسية هي 14.5° أو 20° أو 25°.

- نقطة الخطوة(Pitch Point): هي النقطة التي يحدث عندها التلامس بين دائرتي خطوة لترسين معشقين.
- الجذر(Dedendum): هو عمق السن تحت دائرة الخطوة.
- التاج(Adden dum): هو إرتفاع السن فوق دائرة الخطوة.
- دائرة الجذر(Dedendum Circle): هي الدائرة التي تمر من قعر السن أو جذر السن وتكون متحدة في المركز مع دائرة الخطوة.
- دائرة التاج(Addendum Circle): هي الدائرة التي تمر من قمة السن وتكون متحدة مع دائرة الخطوة.
- الخطوة الدائرية(Circular Pitch): هي المسافة المقاسة على محيط دائرة الخطة بين نقطتين متماثلتين على سنين متجاورين، وتمثل مجموع سمك السن وعرض الفراغ بين السنين ويرمز لها بالرمز P_c ويعبّر عنها رياضياً بالعلاقة التالية:

$$P_c = \frac{\pi d}{N}$$

حيث:

d: قطر دائرة الخطوة.

N: عدد أسنان الترس.

وإذا كان الترسان معشقين بصورة جيدة فيجب أن تتساوى الخطوة الدائرية لهما كما يلي:

$$\frac{\pi d_1}{N_1} = \frac{\pi d_2}{N_2}$$

وعليه تكون النسبة بين عدد الأسنان في الترسين:

$$\frac{d_1}{d_2}=\frac{N_1}{N_2}$$

- الخطوة القطرية(Diametral Pitch): هي عدد الأسنان الموجودة في كل ملمتر من قطر دائرة الخطوة، أو هي النسبة بين عدد الأسنان إلى قطر دائرة الخطوة بالملمتر ، ويرمز لها بالرمز Pd.

يعبر عنها رياضياً بالعلاقة التالية:

$$P_d=\frac{N}{d}$$

حيث:

N: عدد أسنان الترس.

d: قطر دائرة الخطوة.

وعليه تكون العلاقة بين الخطوة القطرية والخطوة الدائرية كما يلي:

$$P_d=\frac{\pi}{P_c}$$

- الموديل(Module): وهو عدد الملمترات من قطر دائرة الخطوة لكل سن، أو هو النسبة بين قطر دائرة الخطوة بالملمتر إلى عدد الأسنان، ويرمز له عادة بالرمز(m).

ويعبر عنه رياضياً بالعلاقة التالية:

$$m = \frac{d}{N}$$

حيث:

d: قطر دائرة الخطوة.

N: عدد أسنان الترس.

- الخلوص(Clearance): المسافة بإتجاه نصف القطر من قمة سن إلى قعر سن مقابل في التروس المعشقة، وتسمى الدائرة التي تمر من قمة الترس المقابل بدائرة الخلوص.
- عرض السن(Tooth Thickness): هو عرض السن مقاس على طول دائرة الخطوة.
- وجه السن(Tooth Face): هو سطح السن فوق سطح الخطوة.
- عرض الحيز(Width Of Space): هو عرض الحيز بين سنين متجاورين مقاساً على طول دائرة الخطوة.
- العمق الكلي(Total Depth): هو المسافة بإتجاه نصف القطر بين تاج السن وجذره ويساوي مجموع التاج والجذر.
- العمق العامل(Working Depth): هو المسافة بإتجاه نصف القطر من دائرة التاج إلى دائرة الخلوص ويساوي مجموع التاج لترسين معشقين.
- خصر السن(Tooth Flank): هو سطح السن تحت سطح الخطوة.
- عرض الوجه(Face width): هو عرض السن مقاساً بصورة موازية لمحور السن.
- نصف قطر الشريحة(Fillet radius): هو نصف القطر الذي يربط دائرة الجذر بمنحنى السن.

- منحنى السن(Profile): هو المنحنى المشكل بواسطة وجه وخصر السن.
- مسار التلامس(Path Of Contoct): هو المسار المشكل بواسطة نقطة التلامس لسنين من بداية التعشيق إلى نهايته.
- قوس التلامس(Arc Of Contact): هو القوس المشكل بوساطة نقطة على دائرة الخطوة من بداية التعشيق إلى نهايته لزوج من التروس المعشقة ويتكوّن من جزئين:

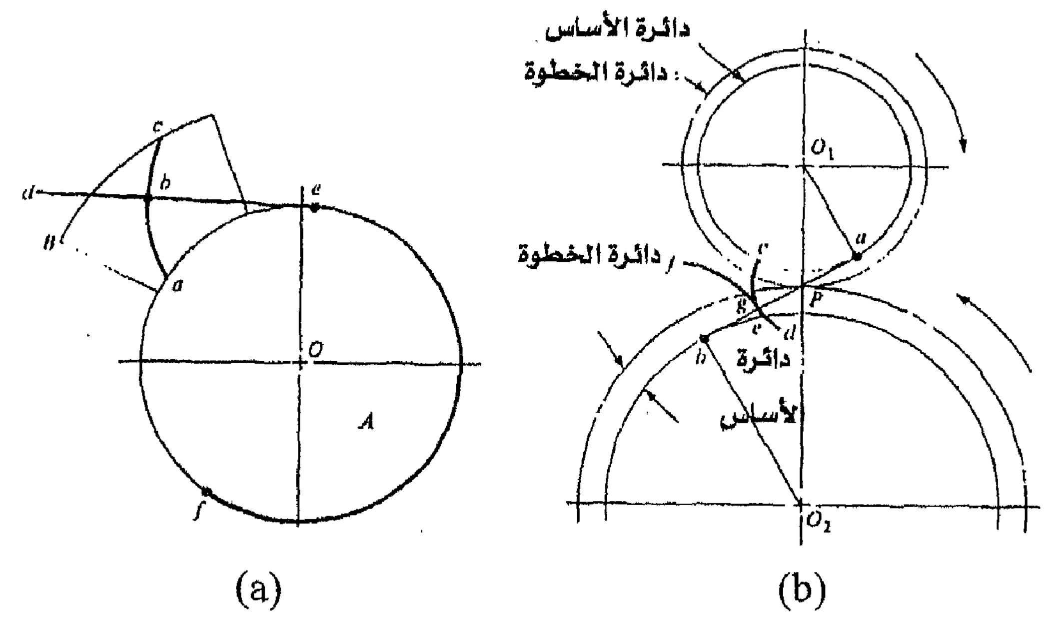
أ. قوس الإقتراب(Arc Of Opproach)، هو جزء مسار التلامس من بداية التعشيق إلى نقطة الخطوة.

ب. قوس التجويف(Arc Of recess): هو جزء مسار التلامس من نقطة الخطوة إلى نهاية التعشيق.

- زاوية التجويف(Angle of recess): هي الزاوية المحصورة بين المستقيم الواصل بين مركزي الترسين المعشقين والمستقيم الواصل بين المركز ونقطة تقاطع منحنيات السن مع خط الضغط ودائرة التاج.
- خلوص التعشيق(Backlash): هو المقدار الذي يتجاوز فيها فراغ السن سماكة السن المعشق معه مُقاساً على دائرة الخطوة.
- زاوية الإقتراب(Angle of approach): هي الزاوية المحصورة بين المستقيم الوصل بين مركزي الترسين والخط الواصل بين المركز ونقطة تقاطع منحنيات السن مع دائرتي الخطوة.

5.3 الخواص الإنفوليوتية(Involute ProPerties).

يمكن إيجاد المنحنى الإنفوليوتي كما في الشكل(7- 5).



شكل(7- 5) إنشاء المنحنى الإنفوليوتي

يتم وصل الحافة B مع الإسطوانةA والتي يكون ملفوفٌ حلوها الخيط def والذي يبقى مشدوداً.

تمثل النقطة b على الخيط نقطة راسمة، ويكون نصف قطر الإنحناء للمنحنى الإنفوليوتي متغيّراً باستمرار، بحيث يكون صفراً عند النقطة a وأكبر ما يمكن عند النقطة c، وعند النقطة b يكون نصف القطر مساوياً للمسافة be، بحيث أنّ النقطة b تدور لحظياً حول النقطة e.

ولهذا يكون الخط المتكوّن de عمودياً على الإنفوليوت على كل نقاط التقاطع، وفي نفس الوقت يكون مماسياً للإسطوانة A، وتسمى الدائرة التي يتكوّن عندها المنحنى الإنفوليوتي بدائرة الأساس.

- ولإختيار المنحنى الإنفوليوتي لنرى مدى تلبيته متطلبات نقل الحركة المنتظمة كما في الشكل(7b- 5) حيث أنّ الترسين المستخدمان لهما المركزان O_1 و O_2 ودائرتا الأساس بنصف قطر O_1a و O_2b.

لنتخيّل أن خيطاً قد لُف بإتجاه عقارب الساعة على الترس رقم1، وسُحب بين النقطتين a وb، ولُف بإتجاه عكس عقارب الساعة حول دائرة الأساس للترس رقم 2.

والآن لنفترض أنّ دائرتي الأساس تدوران بإتجاهين متعاكسين من أجل الحفاظ على الخيط مشدوداً، إنّ النقطة g على الخيط سوف ترسم الإنفوليوت cd على الترس رقم1والإنفوليوت ef على الترس رقم 2.

وهنا يتم إنشاء المنحنيين معاً بواسطة النقطة الراسمة، ولذا تمثل النقطة الراسمة نقطة التلامس، بينما يكون الجزء ab من الخيط هو الخط المُنشيء.

تتحرك نقطة التلامس على طول الخط المنشئ، لا يُغيّر الخط المُنشئ موقعه لأنّه يكون دائماً مماسياً لدائرة الأساس، وبما أنّ الخط المنشئ يكون دائماً عمودياً على المنحنى الإنفوليوتي عند نقطة التلامس، إذاً يتم تلبية متطلبات الحركة المنتظمة.

5.4 أساسيات(Fundamentals):

من الضروري أن تكون لدينا القدرة على رسم الأسنان في زوج من التروس المعشقة، وذلك من أجل تسهيل التعامل مع المشاكل التي قد تواجهنا في تعشيق الأسنان مع بعضها البعض.

من المهم الآن أن نتعلم كيفية إنشاء منحنى الإنفوليوت كما في الشكل(8- 5)، حيث يتم تقسيم دائرة الأساس إلى عدد من الأجزاء المتساوية وتنشأ خطوط نصف قطرية هي OA_0،OA_L، OA_2 ...الخ.

نبدأ من A_1 وننشأ خطوط عمودية هي A_1B_1، A_2B_2، A_3B_3..... الخ، وبعد ذلك على طول A_1B_1 نترك المسافة A_1A_0، وعلى طول A_2B_2 نترك ضعف المسافة A_1A_0...الخ، وبهذا يتم إنشاء نقاط يمكن من خلالها إنشاء منحنى الإنفوليوت.

عند تعشيق ترسين، تدور دائرتا الخطوة لهما على بعضهما البعض بدون إنزلاق، إذا إعتبرنا r_1 نصف قطر الترس الأوّل و r_2 نصف قطر الترس الثاني، وω_1 سرعة دوران الترس الأول و ω_2 سرعة دوران الترس الثاني فإنّ سرعة خط الخطوة تكون متساوية لهما وتعطى بالعلاقة:

$$V = |r_1\omega_1| = |r_2\omega_2|$$

وعليه تكون العلاقة بين نسبة السرعات وأنصاف الأقطار:

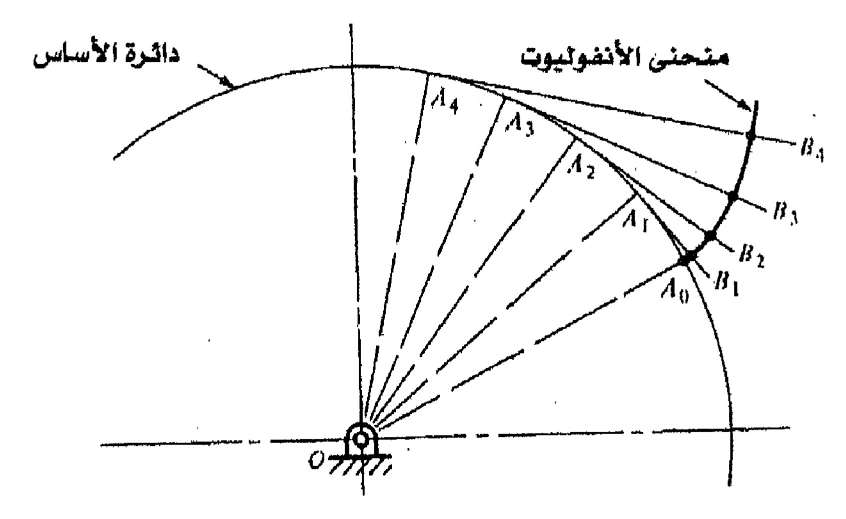
$$\left|\frac{\omega_1}{\omega_2}\right| = \frac{r_2}{r_1}$$

تكسون أوّل خطوة في رسم أسنان التروس المعشقة كما في الشكل(8- 5)، هي إيجاد المسافة بين مركزي الترسين والتي تساوي مجموع نصفي القطر لدائرتي الخطوة، ومن ثمّ تحديد مركز كل من البنيون والترس O_1 و O_2.

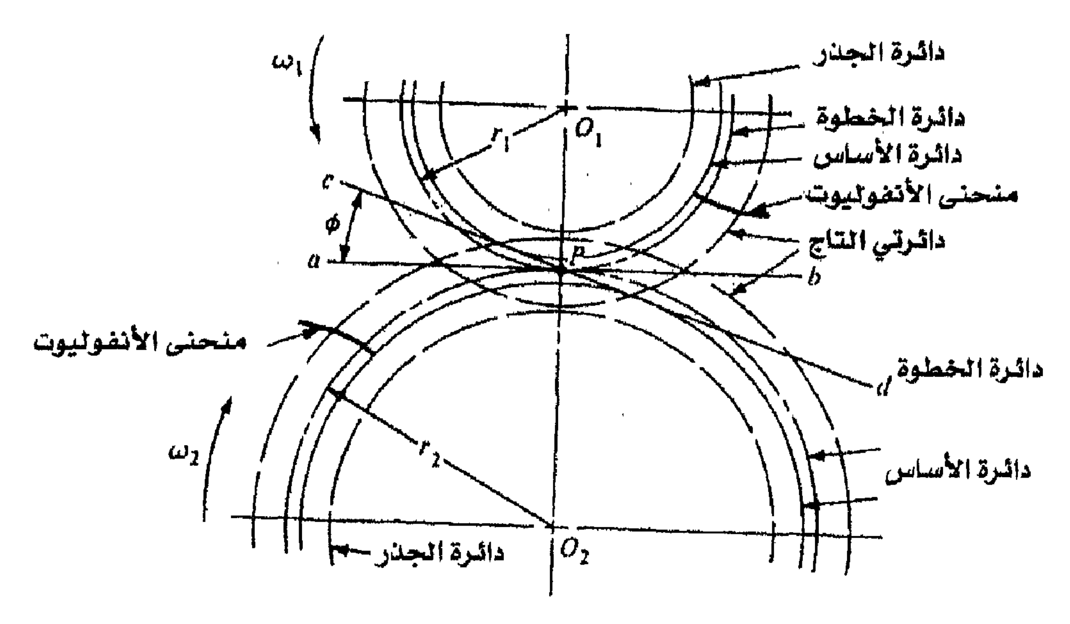
بعد ذلك نقوم بإنشاء دائرتي الخطوة وذلك بمعرفة نصفي القطر r_1 و r_2، وتكون دائرتا الخطوة متماستين عند النقطة P(نقطة الخطوة).

ثمّ نرسم الخط ab الخط المماسي عبر نقطة الخطوة P، نسمي الترس رقم 1 الترس القائد(البينيون)، وبما أنّه يدور بإتجاه عكس عقارب ab، يُعرف الخط cd بثلاثة أسماء هي: خط الضغط، الخط المنشئ، وخط العمل، ويمثّل هذا الخط الإتجاه الذي تؤثر به محصلة القوى بين الترسين، تكون الزاوية ϕ هي زاوية الضغط وتأخذ عادةً القيم $20°$ أو $25°$ أو $14\frac{1}{2}°$.

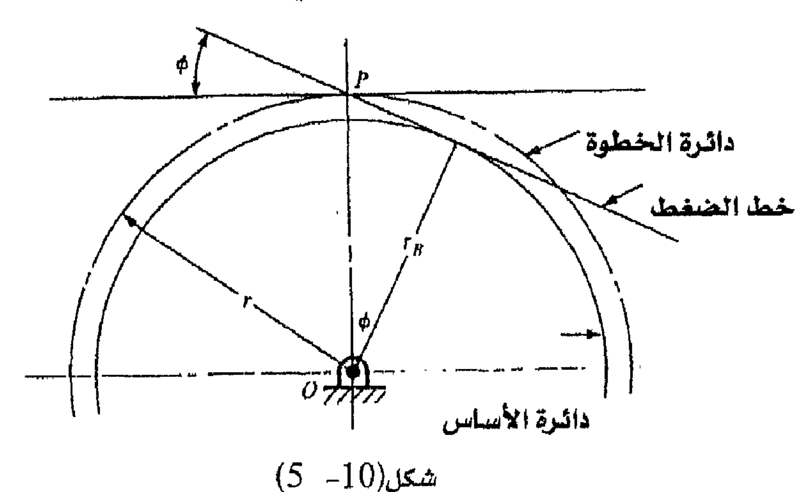
بعد ذلك على كل ترس نرسم دائرة مماسية لخط الضغط، تكون هاتان الدائرتان هما دائرتا الأساس.



شكل(8- 5) إنشاء منحنى الإنفوليوت.



شكل(9- 5) رسم تخطيطي لزوج من التروس



شكل(10- 5)

وبما أنّ خط الضغط مماسياً لدائرتي الأساس فإنّ زاوية الضغط تحدد حجم هاتين الدائرتين، وعليه يمكن إيجاد نصف قطر دائرة الأساس من العلاقة التالي:

$$r_b = r\cos\phi$$

حيث:

r: نصف قطر دائرة الخطوة.

والآن يتم إنشاء المنحنى الإنفوليوتي على كل من دائرتي الأساس، ويستخدم هذا المنحنى لجانب واحد من سن الترس.

ولإيجاد مسافات التاج والجذر نستخدم العلاقات التالية:

$$a = \frac{1}{P_d}$$

$$b = \frac{1.25}{P_d}$$

حيث:

a: مسافة التاج.

b: مسافة الجذر.

p_d: الخطوة القطرية.

ومن ثمّ نرسم دائرتي التاج والجذر لكل من البينيون والترس، ولرسم السن يلزمنا معرفة سمك هذا السن من خلال العلاقة التالية:

$$t = \frac{P_c}{2}$$

حيث:

t: سمك السن.

P_c: الخطوة الدائرية.

وبمعرفة سمك السن وبالتالي الفراغ بين كل سنين، يمكن رسم العدد المطلوب من الأسنان، وفي الشكل(6- 5) يلزم رسم سن واحد على كل ترس، يلزم الآن تحديد الخلوص، حيث إنّ الجزء المحصور بين دائرة الخلوص ودائرة الجذر يتضمن الشريحة(Fillet)، حيث يتم إيجاد الخلوص كما يلي:

$$C = b-a$$

وبتحديد الخلوص ينتهي إنشاء التروس.

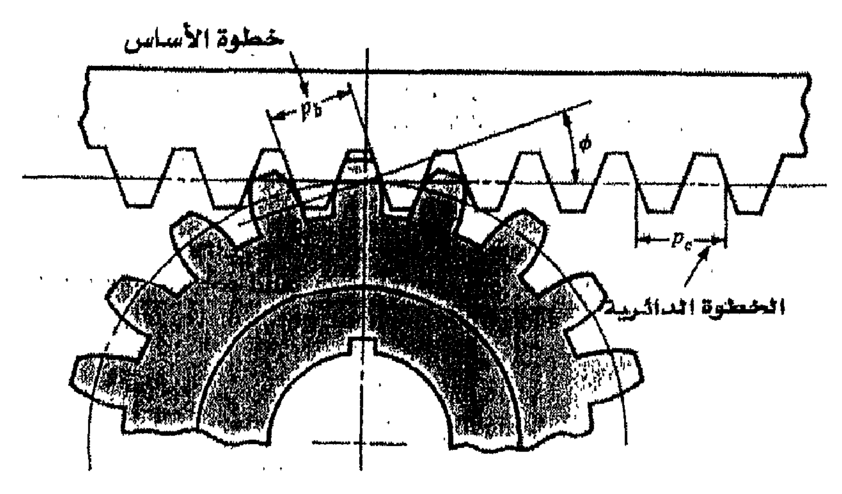
وبالعودة إلى الشكل(6- 5) حيث أنّ البينيون ومركزه O_I هو القائد ويدور باتجاه عكس عقارب الساعة، يكو خط الضغط هو نفسه في الخيط شكل(7a- 5) لإنشاء الإنفوليوت، وإنّ التلامس يحدث على طول هذا الخط، يحدث التلامس عندما يتلامس خصر السن القائد مع قمة السن المنقاد، وهذا يحدث عند النقطة a حيث تقطع دائرة التاج للترس المنقاد خط الضغط.

وإذا رسمنا منحنى السن خلال النقطة a ورسمنا خطوط نصف قطرية من تقاطع هذه المنحنيات مع دائرتي الخطوة إلى مراكز الترسين، نحصل على زاوية الإقتراب لكل ترس.

وعند تلامس الأسنان، تنزلق نقطة التماس إلى أعلى على جانب السن القائد ولذلك سيكون رأس(قمة) السن القائد في حالة تلامس قبل إنتهاء التلامس، وتكون آخر نقطة تلامس عند تقاطع دائرة التاج مع خط الضغط، وتكون هذه النقطةb شكل(6- 5)، وبرسم مجموعة أخرى من المنحنيات للسن خلال النقطة b تحصل على زاوية التجويف لكل ترس بنفس الطريقة التي حصلنا فيها على زاوية الإقتراب.

إنّ مجموع زاويتي الإقتراب والتجويف لأي ترس تسمى زاوية العمل(Angle Of action)، ويسمى الخط ab خط العمل.

وفي حالة الجريدة المسننة(rack) يمكن تخيلها كترس عدل له قطر دائرة الخطوة لا نهائي، ولهذا فإنّ للجريدة المسننة عدد لا نهائي من الأسنان، إنّ جانبي الإنفوليوت للسن على الجريدة المسننة هي خطوط مستقيمة وتعمل زاوية مع خط المراكز مساوية لزاوية الضغط ϕ كما هو موضح في الشكل(11- 5).



شكل(11- 5) بينيون معشق مع جريدة مسننة

إن جانبي الإنفوليوت للسن متماثلان ويمثلان منحنيان متوازيان، حيث أنّ خطوة الأساس ثابتة وتمثل مسافة أساسية بين الجانبين، وترتبط خطوة الأساس بالخطوة الدائرية من خلال العلاقة التالية:

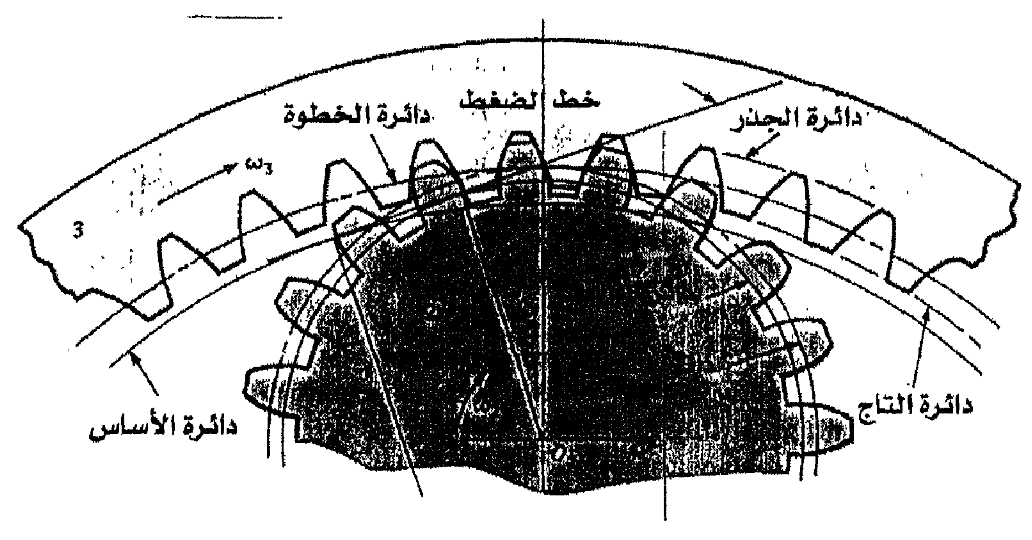
$$P_b = P_c \cos \phi$$

حيث:

P_b: خطوة الأساس.

P_c: الخطوة الدائرية:

أمّا الشكل(12- 5) فيمثل بينيون معشق مع ترس حلقي، نلاحظ أنّ كلا الترسين لهما مركزان للدوران في نفس الجانب لنقطة الخطوة ولذلك تكون مواقع دائرتي التاج والجذر بالنسبة لدائرتي الخطوة معكوسة، بحيث تكون دائرة التاج للترس الحلقي داخل دائرة الخطوة، ونلاحظ أيضاً أنّ دائرة الأساس للترس الحلقي تكون داخل دائرة الخطوة بقرب دائرة التاج.



شكل(12- 5) بينيون معشق مع ترس حلقي(داخلياً)

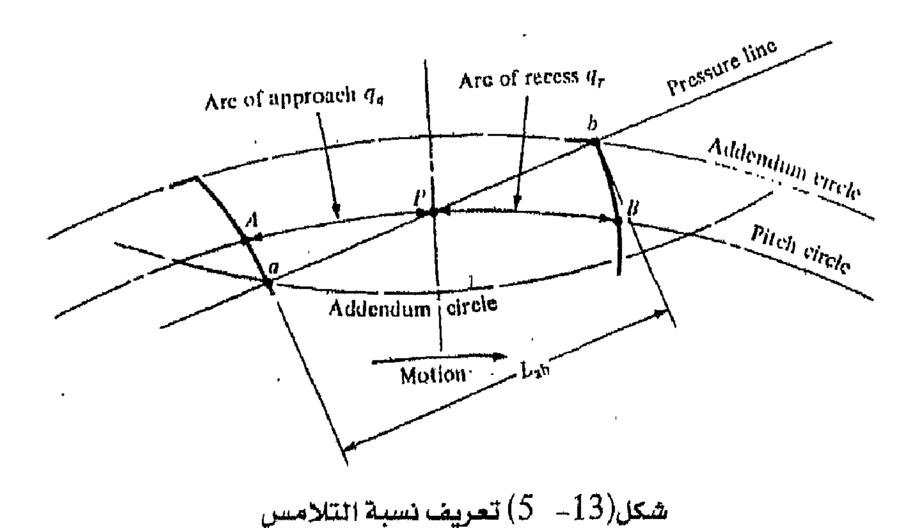
وملاحظة أخرى هامة هي أنّه عند زيادة مسافة المركز سوف يتم إنشاء دائرتي خطوة جديدتين لهما أقطار أكبر لأنهما يجب أن يكونا متماستين عند نقطة الخطوة، لذا فإنّ دائرتي الخطوة لترسين لا تكونان موجودتين حقيقةً إلاّ عند تعشيق زوج التروس.

إنّ تغيير مسافة المركز ليس لها أي أثر على دائرتي الأساس لأنهما يستخدمان لإنشاء منحنيات السن فقط، وذلك فإنّ دائرة الأساس تكون أساسية في الترس، وزيادة مسافة المركز تزيد زاوية الضغط وتقلل طول خط العمل، ولكن تبقى الأسنان متزاوجة، لذلك يتم تلبية متطلبات الحركة المنتظمة ولا تتغير نسبة الحركة الدائرية بين الترسين المعشّقين.

5.5 نسبة التلامس(Contact ratio):

يوضح الشكل(13- 5) منطقة العمل لترسين معشقين،إنّ تلامس السن يبدأ وينتهي عند تقاطع دائرتي التاج مع خط الضغط.

حيث أنّ التلامس الإبتدائي يحدث عند النقطة a والتلامس النهائي عند النقطة b، يتم رسم منحنيات السن خلال هذه النقط عند التقاطع مع دائرة الخطوة عند A و B على التوالي، وكما هو ملاحظ تسمى المسافة AP قوس الإقتراب q_a(arc of Approach)، والمسافة PB قوس التجويف q_r(arc of recess)، ومجموع هذين القوسين يسمى قوس العمل q_t(arc of action).



شكل(13- 5) تعريف نسبة التلامس

على اعتبار أنّ قوس العمل مساوٍ تماماً للخطوة الدائرية، $q_t = p_c$ وهذا يعني أنّ سناً واحداً وفراغه سوف يحتل حيّز القوسAB وبعبارة أخرى عندما يبدأ السن الملامسة عند a، يكون السن السابق قد أنهى ملامسته عندb في نفس الوقت، ولذلك خلال عمل السن من a علىb سيكون هناك تماماً زوج واحد من الأسنان في حالة تلامس.

لنأخذ حالة أخرى يكو فيها قوس العمل أكبر من الخطوة الدائرية، ولكن ليس أكبر بكثير على سبيل المثال $q_t \approx 1.2P_C$ هذا يعني أنه عندما يبدأ أزوج واحد

من الأسنان التلامس عند a يكون هناك زوج آخر في حالة تلامس مسبق لم يصل بعد إلى b، ولذلك لفترة زمنية قصيرة، سيكون هناك زوجان من الأسنان في حالة تلامس، واحدٌ منهما جوار A والآخر جوار B.

ويمتابعة التعشيق يتوقف الزوج بجوار B عن التلامس، تاركاً زوجاً واحد من الأسنان في حالة تلامس، حتى تعيد العملية نفسها مرة أخرى ويسبب طبيعة عمل السن، قد يكون هناك زوج واحد أو زوجان في حالة تلامس، لذا لا بدّ من تعريفٍ لمصطلح نسبة التلامس m_c كما يلي:

$$m_c = \frac{q_t}{P_c}$$

نسبة التلامس هي عدد يشري إلى متوسط عدد أزواج الأسنان في حالة تلامس وهذه النسبة تساوي أيضاً طول مسار التلامس مقسوماً على الخطوة الدائرية.

وعند تصميم التروس يجب أن لا تقل نسبة التلامس عن 1.2، لأنّ إنعدام الدقة في تسلق الأسنان يقلل نسبة التلامس بشكل كبير، ويزيد إحتمالية التصادم بين الأسنان كما أنه يزيد من مستوى الضجيج.

وأسهل طريقة للحصول على نسبة التلامس هي قياس خط العمل ab بدلاً من المسافةAB، وبما أنّ ab مماسي لدائرة الأساسي عند امتداده، فإنّ خطوة الأساسP_b يجب أن تستخدم لحساب m_c بدلاً من الخطوة الدائرية، وباستخدام مفهوم خط العمل L_{ab}، تصبح نسبة التلامس:

$$m_c = \frac{L_{ab}}{P_c Cos_{\Phi}}$$

5.6 التداخل(Interference):

هو تلامس أجزاء من منحنيات السن غير المتزاوجة.

يوضح الشكل(14- 5) ترسين لهما نفس العدد من الأسنان 16 سن، وتم قطعهما على زاوية ضغط مقدارها $14\frac{1}{2}^{\circ}$، الترس القائد رقم 2 يدور مع عقارب الساعة، نقطة التلامس الإبتدائية هي A ونقطة التلامس النهائية هي B وتوجد هاتان النقطتان على خط الضغط، الآن نلاحظ أنّ النقاط المماسية لخط الضغط مع دائرتي الأساس هما C وD وموقعهما [illegible] النقطتين A وB، [illegible] التداخل.

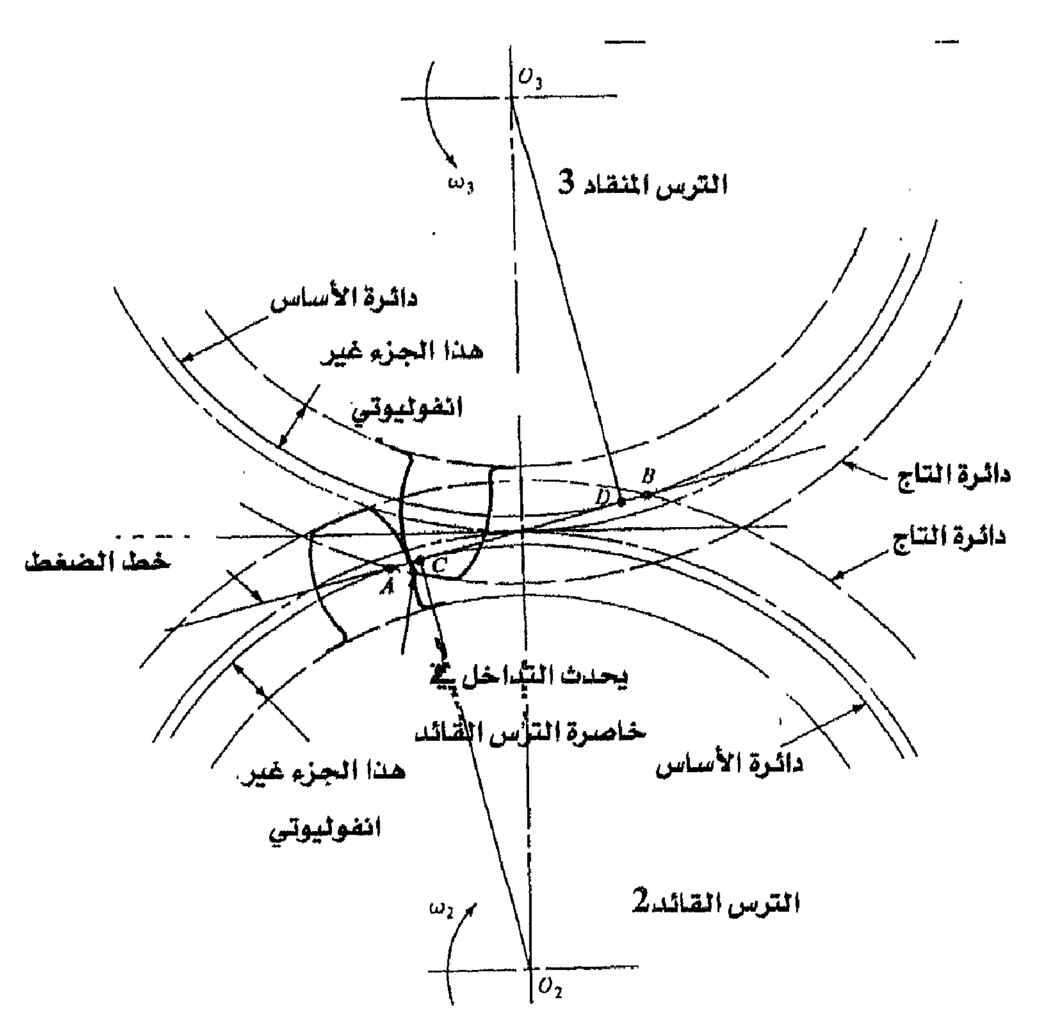
ويتم تفسير التداخل كما يلي: يبدأ التلامس عندما يلامس رأس السن المنقاد خاصرة السن القائد، في هذه الحالة تعمل خاصرة السن القائد تلامساً مع السن المنقاد عند النقطة A، وهذا يحدث قبل أن يصبح جزء الإنفوليوت للسن المنقاد ضمن المحال.

وبعبارة أخرى يحدث التلامس تحت دائرة الأساس للترس رقم 2 في الجزء غير الإنفوليوتي للخاصرة، والتأثير الحقيقي في هذه الحالة هو أنّ رأس أو وجه الأنفوليوت للترس المنقاد يقوم بصدم وحفر الخاصرة غير الإنفوليوتية للترس القائد.

في هذا المثال نفس التأثير يحدث مرة أخرى عندما ينهي السن حالة التلامس، حيث أنّ التلامس يجب أن ينتهي عند النقطة D أو قبلها.

وبما أنه لم ينته حتى النقطة B، يكون تأثير رأس السن المنقاد في الحفر أو التداخل مع خاصرة السن القائد.

وعند تصنيع الترس يؤخذ بالإعتبار إلغاء مشكلة التداخل حيث تقوم سكين القطع بإزالة الجزء المتداخل من الخاصرة، وتُسمى هذه العملية بالقطع السفلي(Undercutting)، ولكن سيئة هذه العملية إضعاف السن وبالتالي إلغاء مشكلة التداخل يؤدي بنا إلى مشكلة أخرى.



شكل(14- 5) التداخل في أسنان ترسين

وفي الواقع إنّ مشكلة ضعف الأسنان الناجمة عن القطع السفلي لم يتم التغلب عليها بالشكل المقبول، حيث يمكن إزالة التداخل باستخدام عدد أكبر من الأسنان على الترس، وإذا كان الترس يقوم بنقل مقدار معين من القدرة فإنه يمكن استخدام عدد أكبر من الأسنان بزيادة قطر دائرة الخطوة.

وهذا بدوره يجعل الترس أكبر حجماً وأقل قبولاً، وهذا أيضاً يزيد سرعة خط الخطوة وبالتالي يزيد من مستوى الضجيج ويقلل القدرة المنقولة.

يمكن أيضاً تقليل التداخل باستخدام زاوية ضغط أكبر، هذا بدوره يؤدي على دائرة أساس أصغر وبالتالي تتخذ معظم منحنيات السن الشكل الإنفوليوتي، فالحاجة لإستخدام بينيون بعدد أسنان قليل يتطلب استخدام زاوية ضغط مقدارها 25°، حتى لو أدى ذلك إلى زيادة الإحتكاك والأحمال على الأسنان وقلل من نسبة التلامس.

يبين جدول(1- 5) أقل عدد أسنان يمكن إستخدامه لتجنب مشكلة التداخل.

جدول(1- 5) أقل عدد من الأسنان لتجنب التداخل.

عدد أسنان البينيون Np	عدد أسنان الترس N_G							
		زاوية اللولبة(الحلزون) Ψ						
	0	5	10	15	20	25	30	35
8								12
9							12	34
10						12	26	∞
11					13	23	93	
12			12	16	24	57	∞	
13	16	17	20	27	50			
14	26	27	34	53	207			
15	45	49	69	181	∞			
16	101	121	287	∞				
17	∞	∞	∞					

تعتمد هذه الأعداد على زاوية الضغط العمودية $\phi_n = 20^\circ$، وزاوية اللولبية Ψ حيث تكون في حالة التروس المستقيمة(العدلة).

$0\Psi =$

5.7 تشكيل أسنان التروس(Forming of Gear Teeth):

هناك عدد كبير من الطرق المستخدمة في تشكيل أسنان التروس، منها السباكة الرملية، السباكة بالقوالب الدائمة، السباكة بالطرد المركزي والسباكة التغليفية.

يمكن تشكيل الأسنان أيضاً بالمساحيق المتالورجية(Powder-metallurgy) أو البثق، حيث يتم تشكيل قضيب من الألمنيوم ويتم تجزيئه إلى شرائح تمثل كلاً منها ترساً، تُشكل التروس التي تتعرض لأحمال عالية في حالة ضغط من الفولاذ، وفي حالة تشكيل الأسنان بالقطع، يأخذ حيز السن الشكل المطابق لسكين القطع.

وإحدى الطرق الحديثة في تسكيل التروس تسمى التشكيل البارد، أو الدرفلة الباردة، حيث تكون هناك قوالب تدور ضد الفولاذ الغفل لتشكيل الأسنان، إنّ الخواص الميكانيكية للمعدن يتم تطويرها بشكل كبير بعملية الدرفلة كما يتم الحصول على منحنى سن ذو جودة عالية.

ومن الطرق الأخرى المستخدمة في تشكيل الأسنان هي عملية التفريز، والقشط.

- التفريز(Milling):

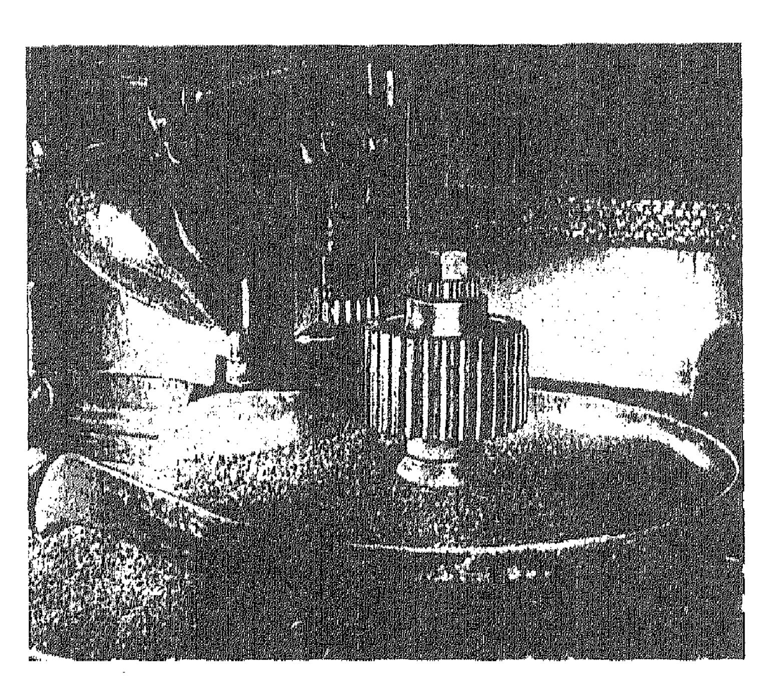
يمكن قطع أسنان الترس بنوع من السكاكين المناسبة والمخصصة لملائمة حيز السن، وبالتالي نحتاج لسكين مختلفة بإختلاف الترس المراد عمله.

حيث يجب مطابق موديل السكين المستخدمة مع موديل الترس المراد عمله ومن معرفة القطر يتم حساب عدد الأسنان المراد فتحها.

- القشط(Shaping):

حيث يتم تشكيل أسنان الترس هنا بسكين على شكل بينيون أو جريدة مسننة، ويوضح الشكل(15- 5) سكين على شكل بينيون يتم تركيبها على المحور العمودي ويتم عمل تغذية بطيئة في الترس حتى العمق المطلوب.

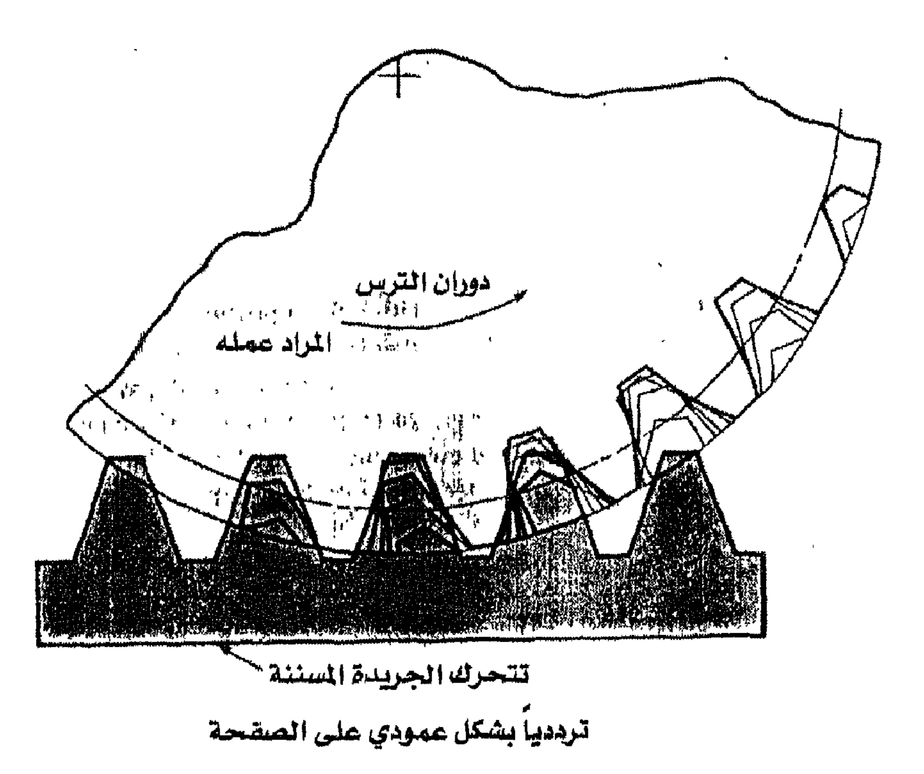
وعندما يحدث تماس بين دائرتي الخطوة للترس المشكل وسكين القطع بدور كل من السكين والترس بخفة بعد كل شوط وهكذا حتى تكون أسنان الترس قد إكتملت وإنتهى تكوين الترس.



شكل(15- 5) تشكيل ترس عَدِل باستخدام سكين على شكل بينيون

ويوضح الشكل(16- 5) عملية تشكيل الأسنان ترس بإستخدام سكين على شكل جريدة مسننة وهي طريقة دقيقة في تشكيل أسنان الترس.

ففي أثناء هذه العملية تتحرك السكين بشكل ترددي وتدخل في الترس المراد تشكيله حتى تصبح دائرتا الخطوة في حالة تماس، وبعد كل شوط قطع يدور الترس بخفة على السكين، وعندما يدور الترس مع السكين مسافة مساوية للخطوة الدائرية تعود السكين إلى نقطة البدء وتستمر العملية حتى تكتمل الأسنان.



شكل(16- 5) تشكيل ترس باستخدام سكين على شكل جريدة مسننة

الإنهاء(finishing):

تتعرض التروس التي تدور على سرعات عالية وتنقل قوى كبيرة لقوى ديناميكية إضافية إذا كان هناك أي خطأ في تشكيل منحنى السن.

ولذلك من الضروري إخضاع الترس لعمليات إنهاء السطوح بعد عملية القطع بصقله وتلميعه.

وهناك عدة ماكنات تستخدم للصقل وقد تنتج منحنى سن بدقة عالية تصل إلى 250 μ_{in} .

ويكون التلميع والصقل ضروري في التروس التي لم تعالج حرارياً بعد القطع، حيث يتم تعشيق هذه التروس مع تروس مقاسة ومصقولة بحجم أسنان أكبر قليلة حتى تصبح أسنان التروس ناعمة ومصقولة.

الوحدة السادسة

تصميم البراغي والعزقات

Design of Screws Fasteners and Connections

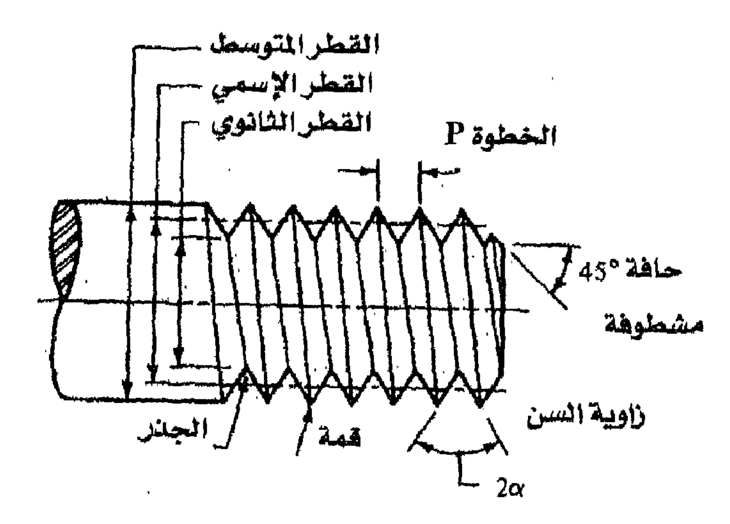
تصميم البراغي والعزقات

6.1 الأسنان المعيارية(القياسية) Standard threads:

- تعريفات خاصة بالأسنان:
- الخطوة(pitch): هي المسافة بين نقطتين متماثلتين على سنين متجاورين مقاسة بموازاة محور السن.
- وفي النظام الإنجليزي تستبدل الخطوة بعدد الأسنان في الإنش N.
- القطر الإسمي(الرئيسي)(major diameter) d وهو اكبر قطر لأسنان البرغي.
- القطر الثانوي(minor dameter) dr أو d1 وهو اصغر قطر لأسنان البرغي.
- التقدم(lead) L، وهو المسافة التي تتحركها العزقة(الصامولة) بموازاة محور البرغي عندما تُلَف دورة واحدة.
- ولبرغي أحادي الباب(سن واحد) يكون التقدم مساوياً لمقدار الخطوة، ولبرغي متعدد الأبواب يحتوي على سنين أو أكثر بجانب بعضها البعض، وعندما يكون البرغي ثنائي الباب يكون التقدم في البرغي مساوياً لضغطي الخطوة وهكذا.

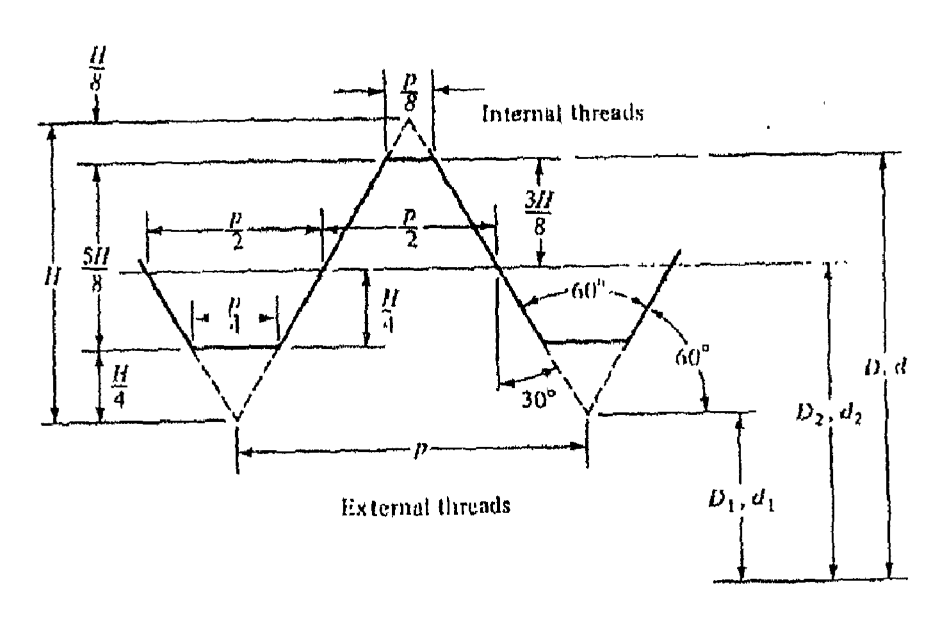
ملاحظة: يشار إلى السن المتري بالرمز M وتكون زاوية رأس السن 60°، ويتم وصف السن المتري بقطره وخطوته بالملمتر، فعلى سبيل المثال يشير الرمز(M12×1.75) إلى سن قطره الإسمي 12mm وخطوته 1.75mm.

أما السن الإنجليزي أو الإنشي سن ويت وورث فإنّ زاوية رأس السن هي 55°.

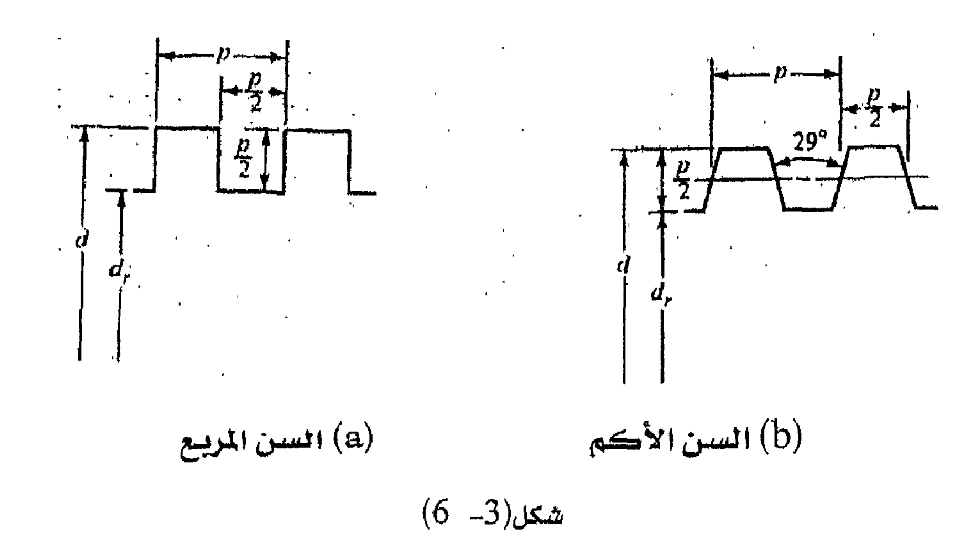


شكل(1- 6) المصطلحات الفنية للبرغي

ويوضح الشكل(2- 6) الأبعاد الرئيسية والثانوية للسن المتري، كما يوضح الشكل(3a- 6) والشكل(3b- 6) السن المربع ولاسن الأكم والتي تستخدم في نقل القدرة والمشهورة بتحملها للأحمال العالية.



شكل(2- 6)



(b) السن الأكم (a) السن المربع

شكل(3- 6)

أظهرت إختبارات الشد العديدة على القضبان المسننة أنها تملك نفس مقاومة الشد للقضبان والأعمدة غير المسننة والتي لها متوسط القطر نفسه في الأعمدة المسننة، وتسمى مساحة الأعمدة غير المسننة بمساحة إجهاد الشد A_t للأعمدة السمننة، تظهر قيم A_t في جدول(6-1) و(2- 6).

جدول(1- 6) الأقطار والمساحات للأسنان الناعمة والخشنة المتربة.

القطر الإسمي d	سلسلة الأسنان الخشنة			سلسلة الأسنان الناعمة		
	الخطوة P	مساحة إجهاد الشد A_t	مساحة القطر الثانوي A_r	الخطوة P	مساحة إجهاد الشد A_t	مساحة القطر الثانوي A_r
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			

3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5.5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1.5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080

6.2 ميكانيكية قلاووظات(براغي) القدرة.

قلاووظ القدرة هو أداة تستخدم في الماكنات من أجل تحويل الحركة الدورانية إلى حركة خطية وعادةً من أجل نقل القدرة.

ومن التطبيقات المعروفة عليه هو عمود المرشد في المخرطة، قلاووظ الملزمة، والجكات وغيرها.

والأسنان المستخدمة في هذا النوع من القلاووظ هي المربعة والأكم كما ذكر سابقاً.

جدول(2- 6)

الأقطار والمساحات لبراغي القدرة الموحدة الإنشية(UNCوUNF)

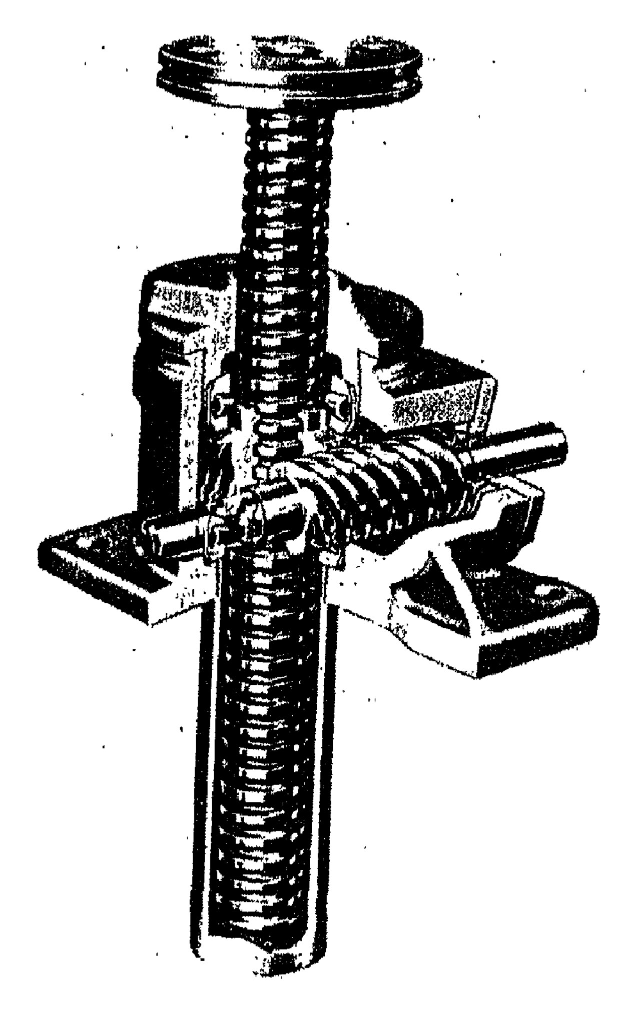
الحجم		سلسلة الأسنان الخشنة				سلسلة الأسنان الناعمة	
	القطر الإسمي in	عدد الأسنان لكل إنش	مساحة إجهاد الشد A_t in^2	مساحة القطر الثانوي A_r in^2	عدد الأسنان لكل إنش	مساحة إجهاد أكثر A_t in^2	مساحة القطر الثانوي A_r in^2
0	0.0600				80	0.00180	0.00151
1	0.0730	64	0.00263	0.00218	72	0.00278	0.00237
2	0.0860	56	0.00370	0.00310	64	0.00394	0.00339
3	0.0990	48	0.00487	0.00406	56	0.00523	0.00451
4	0.1120	40	0.00604	0.00496	48	0.0061	0.00566
5	0.1250	40	0.00796	0.00672	44	0.00880	0.00716
6	0.1380	32	0.00909	0.00745	40	0.01015	0.00874
8	0.1640	32	0.014	0.01196	36	0.01474	0.01285
10	0.900	24	0.0175	0.01450	32	0.0200	0.0175
12	0.2160	24	0.0242	0.0206	28	0.0258	0.0226

$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.0318	0.0269	28	0.0364	0.0326
$\frac{5}{16}$	0.3125	15	0.0524	0.0454	24	0.0580	0.0524
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.0775	0.0678	24	0.0878	0.0809
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.1063	0. 933	20	0.1187	0.1090
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.1419	0.01257	20	0.1599	0.1486
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.89	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

جدول(3- 6) الخطوة المفضلة للسن الأكم:

d,in	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{8}$	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{2}$	3
p,in	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{14}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

وكما ذكر سابقاً من تطبيقات قلاووظات القدرة هي الجك، حيث يوضح الشكل(4- 6) جك مكوّن من ترس دودي وقلاووظ وعزقة.



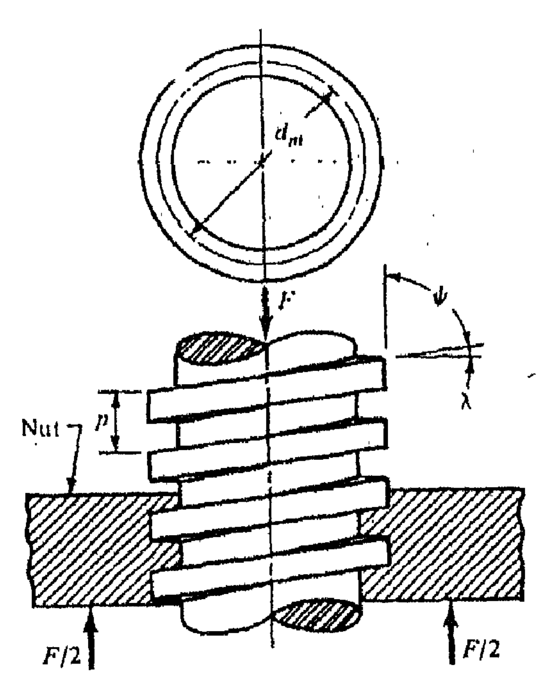
شكل(4- 6) جك من نوع جويس

ويوضح الشكل(5- 6) قلاووظ قدرة مربع السن أحادي الباب قطره المتوسط d_m وخطوته p، زاوية التقدم λ وزاوية اللولبة ψ ومحمل بقوة ضغط محورية مقدارها F، والمراد إيجاد تعبير لقيمة عزم اللّي اللازم لرفع الحمل وآخر لخفض الحمل.

بدايةً لنتخيل أنّ سناً من أسنان القلاووظ منبسط للفة واحدة.

لذا فإنّ طرف من السن سيشكل وتر لمثلث قائم الزاوية والذي تشكل قاعدته محيط دائرة القطر المتوسط وارتفاعه هو التقدم L.

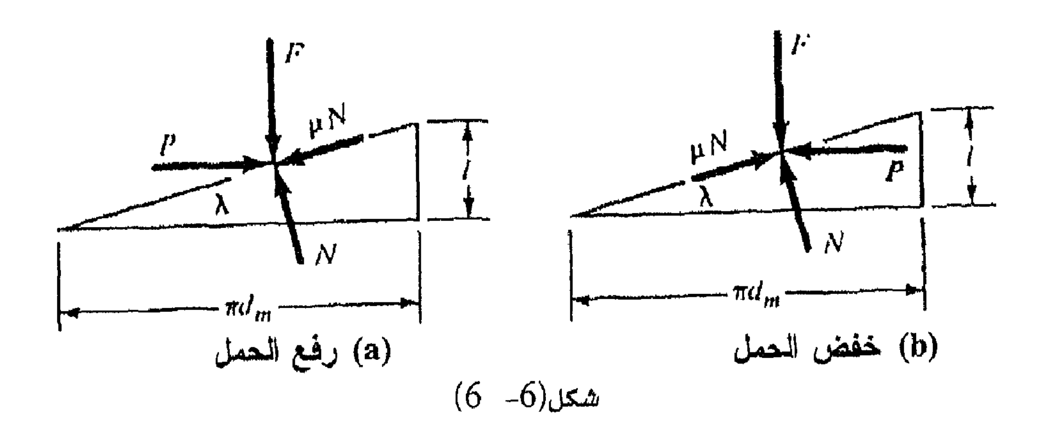
والزاوية λ هي زاوية التقدم للسن، ونعبّر عن مجموع القوى المحورية التي تؤثر عمودياً على مساحة السن بالقوة F.



شكل(5- 6) مقطع من قلاووظ القدرة

لرفع الحمل فإنّ القوة P في الشكل(6a- 6) تؤثر إلى اليمين، ولخفض الحمل تؤثر القو P إلى اليسار(6b- 6).

تحسب قوة الإحتكاك من ناتج حاصل ضرب معامل الإحتكاك μ بالقوة يكون النظام في حالة إتزان تحت تاثير هذه القوى.



(a) رفع الحمل (b) خفض الحمل

شكل(6- 6)

ففي حالة رفع الحمل(الشد):

$$\Sigma F_H = P - N\sin\lambda - \mu N\cos\lambda = 0$$
$$\Sigma Fv = P + \mu\sin\lambda - N\cos\lambda = 0$$

وفي حالة خفض الحمل(الفك):

$$\Sigma F_H = -P - N\sin\lambda + \mu N\cos\lambda = 0$$
$$\Sigma Fv = F - \mu N\sin\lambda - N\cos\lambda = 0$$

وبما أننا غير مهتمين بالقوة العمودية N، يمكن إلغاءها من كل مجموعة من المعادلات ونحل هذه المعادلات لإيجاد القوة P. ففي حالة رفع الحمل(الشد):

$$P = \frac{F(\sin\lambda + \mu\cos\lambda)}{\cos\lambda - \mu\sin\lambda}$$

وفي حالة خفض الحمل(الفك):

$$P = \frac{F(\mu\cos\lambda - \sin\lambda)}{\cos\lambda + \mu\cos\lambda}$$

وبقسمة البسط والمقام على $\cos\lambda$ واستخدام العلاقة $\tan\lambda = L/\pi d_m$

تصبح قيمة P في حالة رفع الحمل:

$$P = \frac{F[(L/\pi d_m) + \mu]}{1 - (\mu L/\pi d_m)}$$

وفي حالة خفض الحمل:

$$P = \frac{F[\mu - (L/\pi d_m)]}{1 + (\mu L/\pi d_m)}$$

ولإيجاد العزم(Torque) حيث أنّه ناتج حاصل ضرب القوة P بنصف القطر المتوسط $\frac{d_m}{2}$، يصبح العزم اللازم لرفع الحمل كما يلي:

$$T = \frac{Fd_m}{2}\left(\frac{L + \pi\mu d_m}{\pi d_m - \mu L}\right)$$

حيث أنّ T: هو العزم اللازم للتغلب على إحتكاك السن ورفع الحمل.

أما العزم اللازم لخفض الحمل يمكن إيجاده كما يلي:

$$T = \frac{Fd_m}{2}\left(\frac{\pi\mu d_m - L}{\pi d_m + \mu L}\right)$$

وهذا العزم يلزم أيضاً للتغلب على جزء من قوة الإحتكاك في خفض الحمل.

وفي حالات خاصة حيث يكون التقدم كبيراً وقوة الإحتكاك قليلة بحيث أنّ الحمل يخفض بنفسه جاعلاً البرغي يدور بدون أي جهد خارجي.

وفي هذه الحالات يكون العزم Tسالباً أو صفراً في المعادلة الأخيرة، وإذا كان العزم الناتج من نفس المعادلة موجباً يقال أنّ البرغي ذاتي الإغلاق(القفل) –(Self-locking).

فتصبح العلاقة للإغلاق الذاتي:

$$\pi\mu d_m > L$$

وعند قسمة طرفي المتباينة على πd_m:

$$\mu > \frac{L}{\pi d_m}$$

ولكن $\tan\lambda = \frac{L}{\pi d_m}$ وهذا يعني أنّ:

$$\mu > \tan\lambda$$

وهذه العلاقة تشير إلى انّ حالة الإغلاق الذاتي تحدث عندما يكون معامل الإحتكاك للسن يساوي أو أكبر من ظل زاوية التقدم.

- يمكن أيضاً إيجاد كفاءة السن كعامل مفيد في تقييم براغي القدرة على إعتبار أنّ $\mu = 0$ نحصل على:

$$T_0 = \frac{FL}{2\pi}$$

حيث أنّ T_0 هو العزم اللازم فقط لرفع الحمل بإنعدام الإحتكاك وعليه تصبح الكفاءة:

$$\mu = \frac{T_o}{T} = \frac{FL}{2\pi T}$$

T: العزم اللازم لرفع الحمل(الشد).

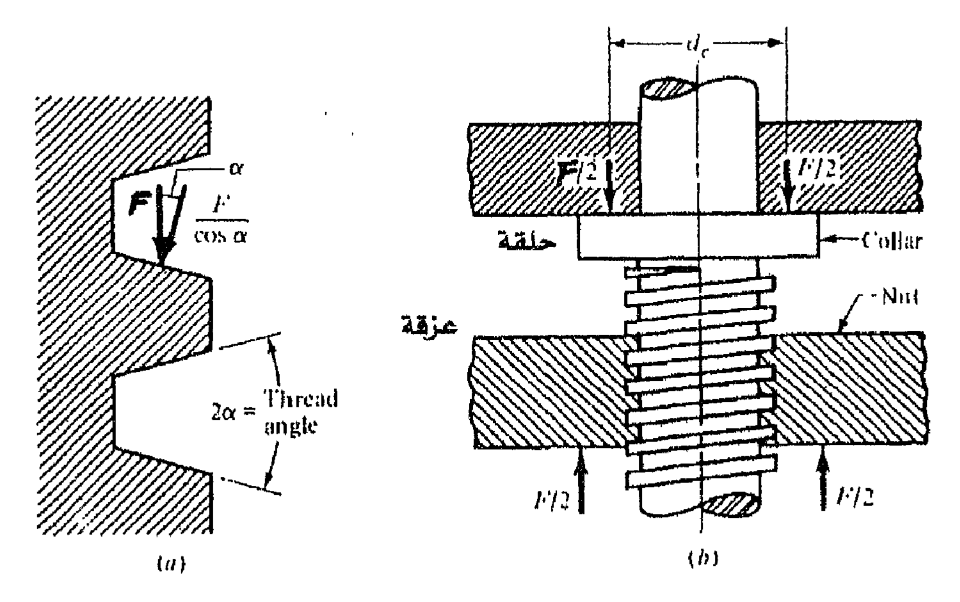
وجميع هذه المعادلات تستخدم في حالة الأسنان المربعة حيث تكون القوى العمودية على الأسنان موازية لمحور البرغي، وفي حالة السن الأكم وغيره من الأسنان تكون القوة العمودية على السن مائلة عن المحور بسبب وجود زاوية السن 2α وزاوية التقدم λ.

وبما أنّ زاوية التقدم صغيرة فإنّه يمكن إهمالها لها ويبقى فقط أثر زاوية السن مأخوذاً بعين الإعتبار.

إنّ أثر الزاوية α يكمن في زيادة قوة الإحتكاك بسبب الأثر الإسفيني للأسنان.

ففي حالة رفع الحمل(الشد) للقلاووظ يعطى العزم بالمعادلة التالية:

$$T = \frac{Fd_m}{2}\left(\frac{L + \pi\mu d_m \sec\alpha}{\pi d_m - \mu L \sec\alpha}\right)$$



شكل(7- 6)(a) أثر القوة العمودية على السن الأكم

(b) حلقة دفع قطرها الإحتكاكي d_c

في قلاووظ القدرة لا تكون كفاءة السن الأكم كما في حالة السن المربع، بسبب الإحتكاك الإضافي الناتج عن الأثر الإسفيني(يعمل السن كإسفين)، ولكنه مفضل بسبب سهولة التصنيع وإمكانية استخدام عزقة منفصلة لحمايته من الإهتراء.

عادةً يجب إستخدام مركبة ١ ـه للعزم في تطبيقات قلاووظ القدرة.

حيث عندما يتم تحميل القلاووظ محورياً، يتم إستخدام حلقة بين الأعضاء الدوارة والثابتة من أجل حمل المركبة المحورية كما في الشكل(7- 6) الذي يوضح إستخدام حلقة دفع، حيث يفترض أنّ الحمل يكون مركزاً على القطر المتوسط لهذه الحلقة d_c.

وإذا إعتبرنا أنّ μ_c هو معامل إحتكاك الحلقة، فيكون العزم اللازم هو:

$$T_c = \frac{F\mu_c d_c}{2}$$

مثال(1): برغي(قلاووظ) قدرة مربع السن قطره الإسمي 32mm وخطوته 4mm، ثنائي الباب، إذا علمت أنّ $\mu = \mu_c = 0.08$ و $d_c = 40mm$, $F = 6.4KN$ لكل قلاووظ، أوجد ما يلي:

أ. عمق السن، عرض السن، القطر المتوسط، القطر الثانوي، والتقدم.

ب. العزم اللازم لتدوير البرغي بإتجاه الحمل.

ج. العزم اللازم لتدوير البرغي ضد الحمل.

د. الكفاءة الكلية.

الحل:

أ. إنّ عمق وعرض السن المربع متساوي ويساوي كل منهما نصف الخطوة أي يساوي 2mm.

$$d_m = d - \frac{P}{2} = 32 - 2 = 30 \ mm$$

$$d_r = d - P = 32 - 4 = 28 \ mm$$

$$L = np = 2(4) = 8 \ mm$$

ب. لإيجاد العزم اللازم لتدوير البرغي بإتجاه الحمل نستخدم العلاقة:

$$T = \frac{Fd_m}{2}\left(\frac{L + \pi\mu d_m}{\pi d_m - \mu L}\right) + \frac{F\mu_c d_c}{2}$$

$$= \frac{6.4\times10^3\times30\times10^{-3}}{2}\left[\frac{8\times10^{-3}+\pi\times0.08\times30\times10^{-3}}{\pi\times30\times10^{-3}-0.08\times8\times10^{-3}}\right]$$

$$+\frac{6.4\times10^3\times0.08\times40\times10^{-3}}{2}$$

$$= 15.94 + 10.24 = 26.18 N.m$$

ج. لإيجاد العزم اللازم لتدوير البرغي ضد الحمل نستخدم العلاقة:

$$T = \frac{Fd_m}{2}\left(\frac{\pi\mu d_m - L}{\pi d_m + \mu L}\right) + \frac{F\mu_c d_c}{2}$$

$$= \frac{6.4\times10^3\times30\times10^{-3}}{2}\left[\frac{\pi(0.08)\times30\times10^{-3}-8\times10^{-3}}{\pi\times30\times10^{-3}-0.08\times8\times10^{-3}}\right]$$

$$+\frac{6.4\times10^3\times0.08\times40\times10^{-3}}{2}$$

$$= -0.466 + 10.24 = 9.77 N.m$$

د. الكفاءة الكلية:

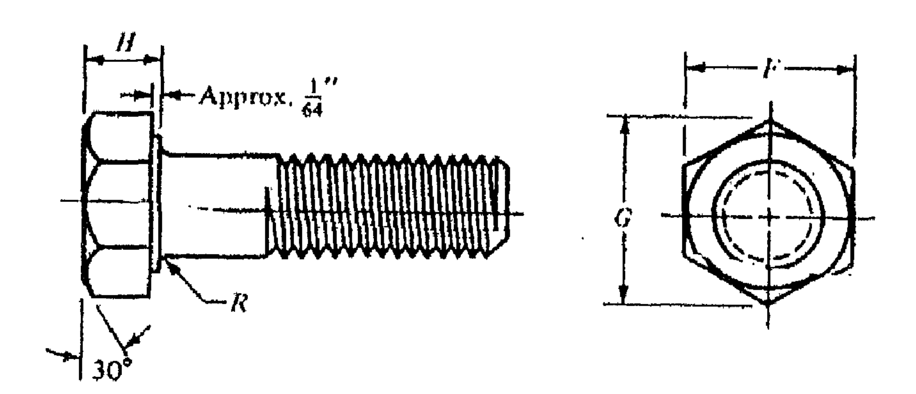
$$\mu = \frac{FL}{2\pi T} = \frac{6.4\times10^3\times8\times10^{-3}}{2\pi(26.18)}$$

$$= 0.311$$

$$= 31.1\%$$

6.3 المرابط المسننة(Theaded Fasteners):

يوضح الشكل(8- 6) رسم تخطيطي لبرغي سداسي الرأس حيث تكون نقاط تركيز الإجهاد عند نقاط إلتقاء الرأس مع رقبة البرغي وعند بداية الأسنان.



شكل(8- 6) رسم تخطيطي لبرغي سداسي الرأس

إنّ طول الجزء المسنن في البراغي الإنشية يعطي من خلال العلاقات التالية:

$$L_T = \begin{cases} 2D + \frac{1}{4}\text{ in} & L \le 6 \text{ in} \\ 2D + \frac{1}{2}\text{ in} & L > 6 \text{ in} \end{cases}$$

وللبراغي المترية يعطى الطول من خلال العلاقات التالية:

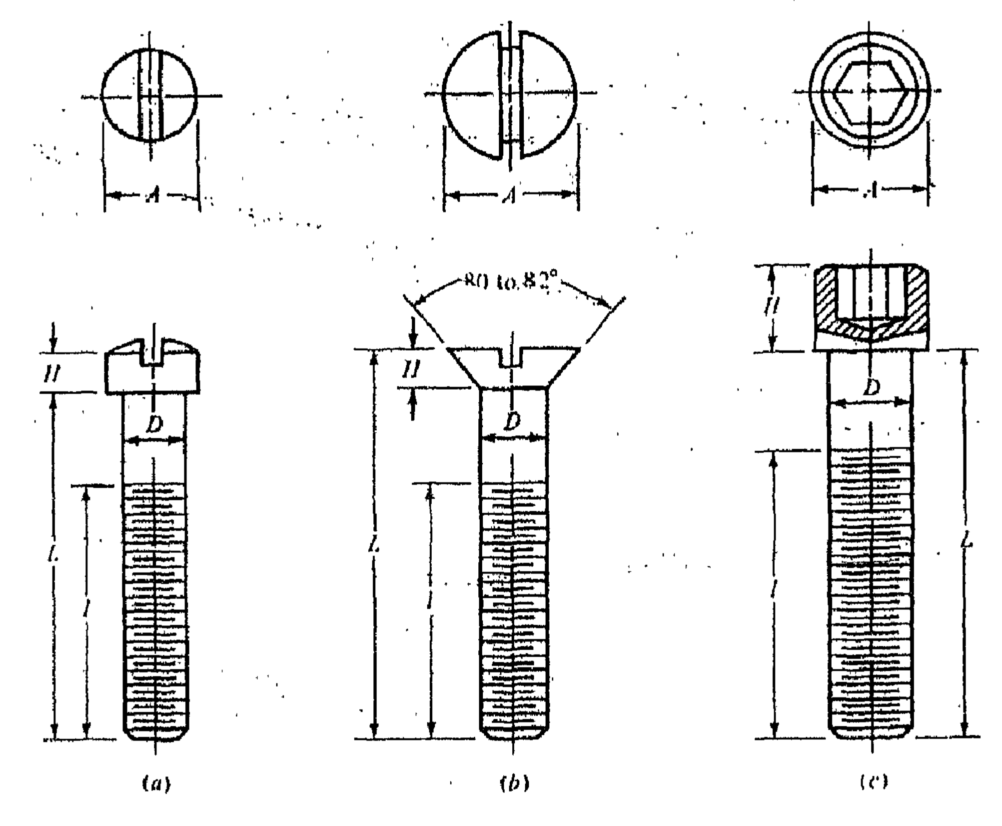
$$L_T = \begin{cases} 2D + 6 & L \le 125\text{mm} \quad D \le 48 \text{ mm} \\ 2D + 12 & 125 < L \le 200\text{mm} \\ 2D + 25 & L > 200\text{mm} \end{cases}$$

تكون ثقوب البراغي عادةً ذات حواف حادة بعد عملية الثقب، وهذا قد يزيد من تركيز الإجهاد، لذا توضع فكله(حلقة)(Washer) تحت البرغي لتمنع ذلك، ويجب أن تكون مصنوعة من الفولاذ المصلّد وتُحمل مع البرغي بحيث تكون الحواف الحادة في الثقب مواجهة لوجه الفلكة.

والهدف من البرغي هو ربط جزئين أو أكثر مع بعضها البعض تؤدي أحمال الربط إلى تمدد أو إستطالة في البرغي، ينشأ حمل الربط نتيجة لف العزقة(الصامولة)حتى يتمدد البرغي إلى حد المرونة، وإذا لم يحدث إرتخاء في العزقة يبقى الشد في البرغي كحمل مسبق أو حمل ربط.

في عملية الشد يجب إبقاء رأس البرغي ثابتاً في حين يتم لف العزقة، ففي هذه الحالة لا يتعرض ساق البرغي لعزم الإحتكاك في اسن.

يكون رأس البرغي ذو القبعة(الغطاء)السداسي أقل سمكاً من البرغي سداسي الرأس(hexagon–hedbolt)، ويتم إستخدام البراغي ذات القبعة السداسية في نفس تطبيقات البراغي سداسية الرأس، ومن الأنواع الشائعة للبراغي ذات القبعة في الشكل(9- 6).



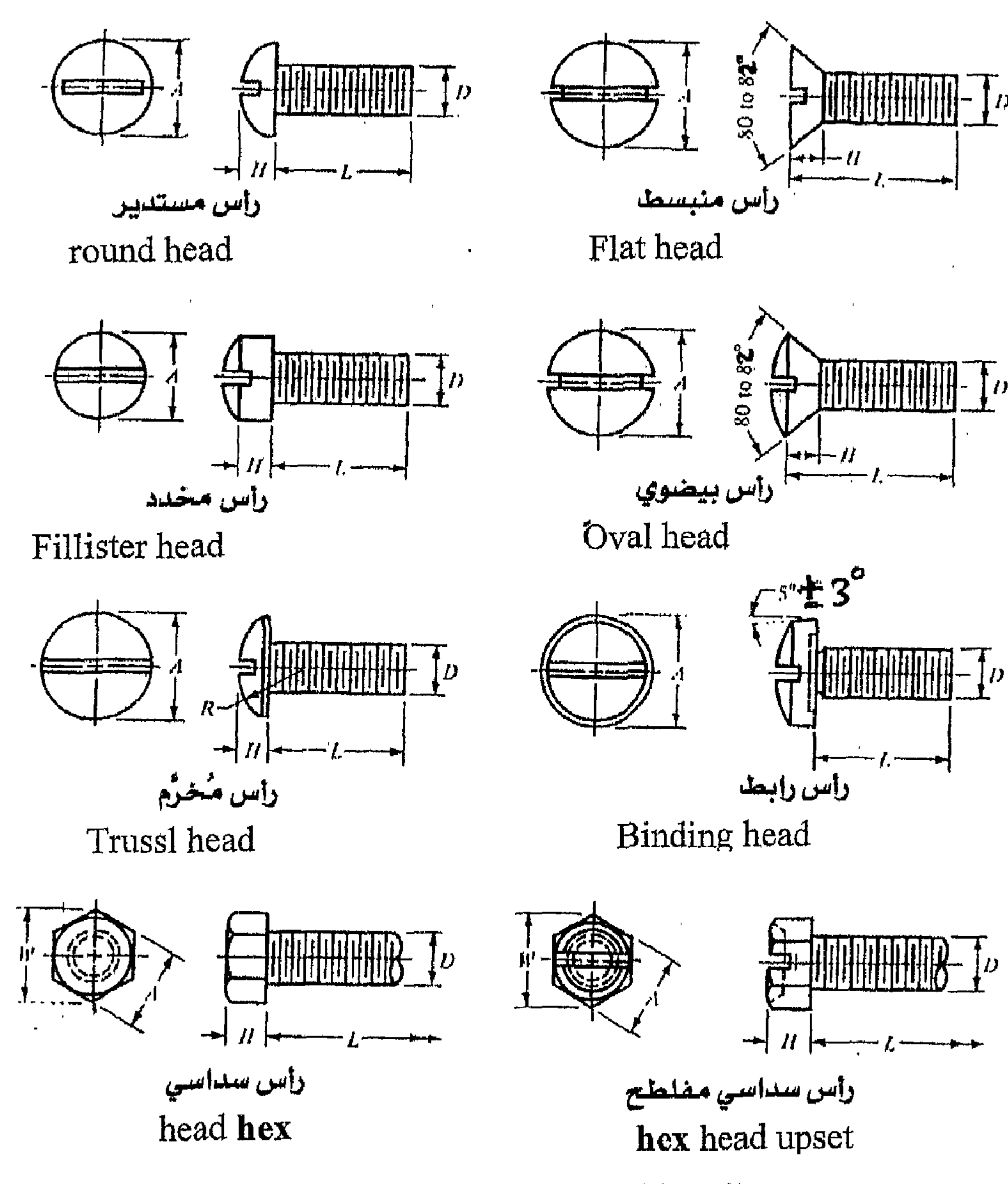
شكل(9- 6) بعض أنواع البراغي ذات القبعة

أ. رأس مخدّد (fillister head).

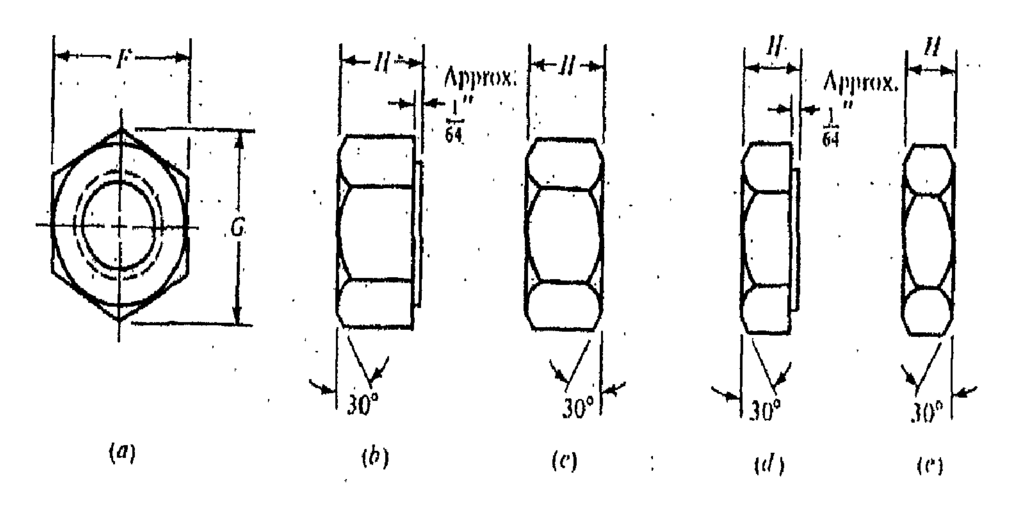
ب. رأس منبسط (flat head).

ج. رأس سداسي مجوف (hexagonal socket head).

يوضح الشكل(10- 6) مدىً واسع من رؤوس البراغي، كما يوضح الشكل(11- 6) أنواعاً مختلفة من العزقات السداسية.



شكل(10- 6) انواع مختلفة من رؤوس البراغي



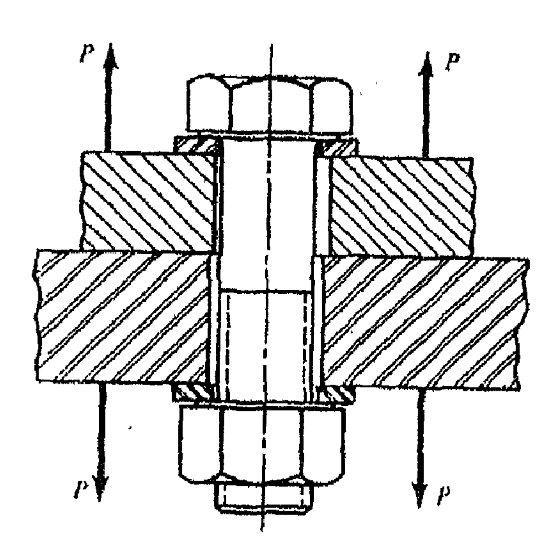
شكل(11- 6) أنواع مختلفة من العزقات السداسية

خلال عملية الشد يأخذ السن الأوّل في العزقة(الصامولة) جميع الحمل، ولهذا يحدث خضوع، ولكن بسبب التقوية التي تحدث نتيجة التشكيل البارد، وحيث أنّ الحمل يتوزع على حوالي ثلاثة أسنان من العزقة يقلل هذا الأمر حدوث الخضوع، هذا السبب يجب عدم إعادة استخدام العزقات حيث أنها تصبح خطرة.

6.4 وصلات الشد– المرابط:

تصمم الوصلات بحيث تكون قوية وغير قابلة للإنهيار وتقاوم أحمال الشد الخارجية، العزوم،أحمال القص أو مجموعة من هذه الأحمال.

يوضح الشكل(12- 6) وصلة البرغي في حالة شد، لاحظ وجود الخلوص في ثقوب البرغي، وكذلك إمتداد بعض أسنان البرغي خارج الوصلة.



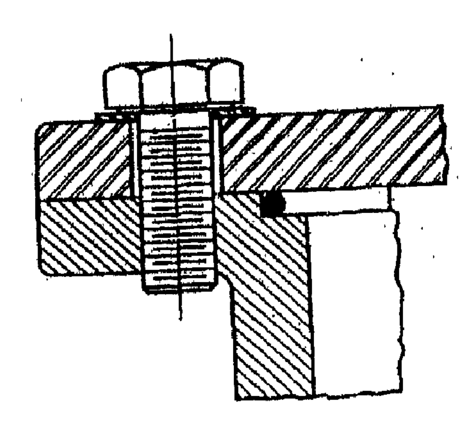
شكل(12- 6) وصلة لبرغي في حالة شد

كما ذكر سابقاً، تستخدم البراغي من أجل ربط جزئين أو أكثر مع بعضها البعض، عند لف العزقة يستطيل(يتمدد) البرغي تبعاً لحمل الربط المؤثر، يسمى هذا الحمل بالشد المسبق أو الحمل المسبق.

ويظهر في الوصلة بعد شد العزقة بالشكل الصحيح، بغض النظر عن وجود القوة الخارجية P أم لا.

عند ربط الأعضاء مع بضعها البعض بواسطة برغي فإنّ حمل الربط الذي يسبب سداً في البرغي يتسبب في حدوث ضغط في الأعضاء المربوطة.

ومثال آخر على وصلات الشد كما في الشكل(13- 6).



شكل(13- 6) برغي ذو القبعة السداسية يستخدم في أسطوانات الضغط العالي

ونوع آخر من البراغي المستخدمة في الربط هو البرغي مسنن الطرفين(Stud) وهو عبارة عن عمود مسنن من الطرفين يتم ربطه في العضو السفلي بدايةً ثمّ يثبت عليه العضو العلوي بحيث تستخدم الفلكة(Washer) ثمّ العزقة للتثبيت.

يمكن إعتبار هذا النوع من البراغي دائم، حيث يمكن فك الوصلة عدة مرات وذلك بفك الفلكة والعزقة، وبهذا يبقى الجزء السفلي المسنن من البرغي سليماً ولا يتلف نتيجة الإستخدام المتكرر.

- يعبّر ثابت الصلابة(Stiffness Constant) للأعضاء المرنة مثل البرغي في الوصلة عن النسبة بين القوة المطبقة على العضو ومقدار الإنحراف(الإستطالة) الناتجة عن القوة.
- يمثل مقبض الوصلة في الشكل(12- 6) مجموع سماكات كلا العضوين الذين يتم ربطهما وكلا الفلكيتين، أما الشكل(13- 6) فيمثل مقبض الوصلة سماكة العضو العلوي مضافاً له سمكة الفلكة.

إنّ صلابة الجزء المربوط من البرغي تتكون من جزئين، وهما الساق غير السمنن والجزء المسنن، ولذلك فإنّ ثابت الصلابة للبرغي يكون مكافئاً لصلابة زنبركين(نابضين) على التوالي كما يلي:

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}$$

$$K=\frac{K_1K_2}{K_1+K_2}$$

حيث يتم إيجاد ثابت الصلابة للجزء المسنن وغير المسنن في البرغبي في منطقة الربط كما يلي:

$$K_T=\frac{A_tE}{L_T}$$

$$K_d=\frac{A_dE}{L_d}$$

حيث:

k_T: ثابت الصلابة للجزء المسنن.

A_t: مساحة إجهاد الشد.

L_T: طول الجزء المسنن في المقبض

E: معامل المرونة.

A_d: مساحة القطر الإسمي للبرغي.

L_d: طول الجزء غير المسنن في المقبض.

K_d: ثابت الصلابة للجزء غير المسنن.

وباستخدام كلا المعادلتين يمكن إستخلاص الصلابة الفعالة للبرغي K_b كما يلي:

$$K_b=\frac{A_dA_tE}{A_dl_T+A_tL_d}$$

6.5 وصلات الشد- الأعضاء:

في هذا الجزء سنقوم بدراسة صلابة الأعضاء في منطقة الربط، هناك أكثر من عضوين ضمن المقبض في الوصلة، وتؤثر جميعها في آن واحد كما لو كان زنبركات(نوابض) إنضغاطية على التوالي، وبالتالي يكون ثابت الصلابة لها كما يلي:

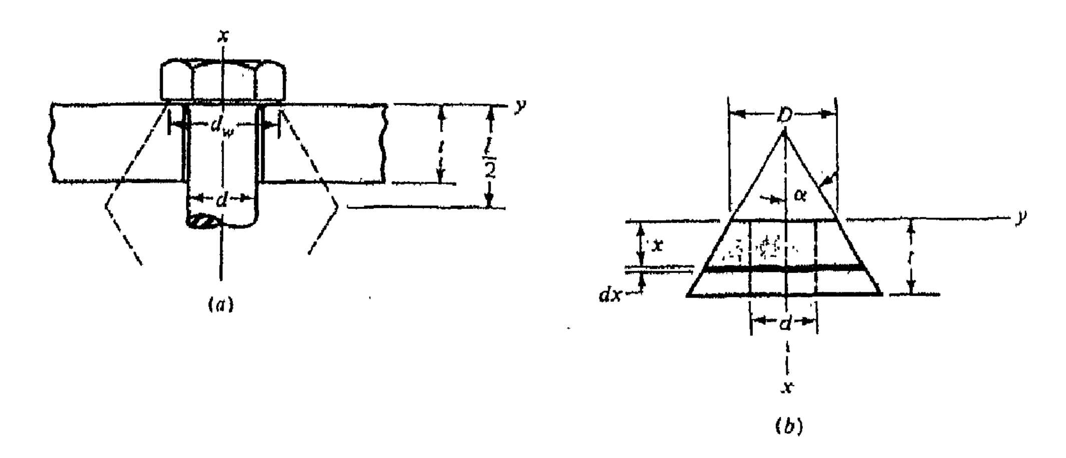
$$\frac{1}{K_m}=\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}+\frac{1}{K_3}+..........+\frac{1}{Ki}$$

وإذا كان أحد الأعضاء المستخدمة كاسكيت لينة(حشوة)(gasket)، خاصة يمكن إهمال صلابة الأعضاء الأخرى وهنا نستخدم فقط صلابة الكاسكيت (الحشوة).

في حالة عدم وجود حافظة، يصعب الحصور على صلابة الأعضاء إلاّ بالإختبارات العملية.

يوضح الشكل(14b- 6) الشكل الهندسي العام للمخروط المعرّض للقوة المؤثرة على الأعضاء، حيث تستخدم نصف زاوية الرأسα، وعندما تكون$\alpha = 45^\circ$ فإنّ بعض التقارير تشير إلى عدم الملاءمة لحساب الصلابة.

وعندما يكون التحميل مقيداً بفلكه من الفولاذ المصلّد أو حديد الصب أو الألمنيوم، تصبح زاوية الرأس أصغر وتشير التقارير إلى انها محصورة بين قيمتين هما $25^\circ \le \alpha \le 33^\circ$ لمعظم المجموعات، ولكننا سوف نستخدم$\alpha = 30^\circ$ نصف زاوية رأس المخروط.



شكل(14- 6) توزيع قوى الضغط في عضو الوصلة

وبالعودة إلى شكل(14- 6) نلاحظ أنّ الإستطالة لعنصر المخروط الذي سماكته d_x والمعرّض لقوة شد مقدارها P هو:

$$d_\delta = \frac{Pd_x}{EA} \text{...(1)}$$

ويتم حساب المساحة كما يلي:

$$A = \pi(r_o^2 - r_i^2) = \pi\left[\left(x\tan\alpha + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2\right]$$

$$= \pi\left(x\tan\alpha + \frac{D+d}{2}\right)\left(x\tan\alpha + \frac{D-d}{2}\right) \text{...........................(2)}$$

بتعويض(2) في(1) نحصل على قيمة الإنحراف(الإستطالة) كما يلي:

$$\delta = \frac{p}{\pi E}\int_0^t \frac{dx}{[x\tan\alpha + (D+d)/2][x\tan\alpha + (D-d)/2]}$$

ويتم إيجاد قيمة الإستطالة δ :

$$\delta = \frac{P}{\pi E d\tan\alpha} Ln\frac{(2t\tan\alpha + D - d)(D+d)}{(2t\tan\alpha + D + d)(D-d)}$$

وبهذا يكون ثابت الصلابة للمخروط المتأثر بالقوة في عضو الوصلة كما يلي:

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{\pi E d \tan}{Ln \frac{(2t \tan \alpha + D - d)(D + d)}{(2t \tan \alpha + D + d)(D - d)}}$$

وبتعويض قيمة الزاوية $\alpha = 30°$ تصبح قيمة K:

$$K = \frac{0.577 \pi E d}{Ln \frac{(1.15t + D - d)(D + d)}{1.15t + D + d)(D - d)}}$$

وإذا كان معامل المرونة E هو نفسه لجميع الأعضاء في الوصلة وفي حالة تماثل، يمكن إعتبار الوصلة كنابضين على التوالي حيث $K_m = k/m$ ، وباستخدام L= 2t طول المقبض وdw قطر الفلكة، يمكن إيجاد ثابت الصلابة للأعضاء k_m كما يلي:

$$K = \frac{\pi E d \quad \tan \alpha}{2Ln \frac{(L \tan \alpha + d_w - d)(d_w + d)}{(L \tan \alpha + d_w + d)(d_w - d)}}$$

وبما أنّ قطر الفلكة أكبر بحوالي 50% من قطر المريط الذي هو برغي سداسي الرأس أو برغي ذو قبعة سداسية، يمكن الحصول على معادلة أبسط بتعويض$d_w = 1.5d$، وإذا إستخدمنا كذلك $\alpha = 30°$ نحصل على معادلة جديدة لقيمة k_m كما يلي:

$$k_m = \frac{0.577 \pi E d}{2Ln\left(5 \frac{0.577L + 0.5d}{0.577L + 2.5d}\right)}$$

6.6 مقاومة البرغي(Bolt Strength):

تعتبر مقاومة البرغي مفتاح التصميم والتحليل لوصلات البراغي، ويتم التعبير عن مقاومة البرغي بأقل مقاومة دليلية(minimum Proof Strength) أو اقل حمل دليلي(minimum Proof Load) وأقل مقاومة شد(minimum tensile Strength).

الحمل الدليلي هو أكبر حمل(قوة) يمكن أن يحتمله البرغي بدو إكتساب تشوهاً دائماً.

يوضح جدول(4- 6)المواصفات الأمريكية القياسية للبراغي الإنشية حسب SAE.

جدول(4- 6) مواصفات SAE للبراغي الفولاذية الإنشية:

المرتبة SAE GRADE NO	مدى الحجم SIZE RANGE INCLUSIVE IN	اقل مقاومة دليلية MINIMUM PROOF STRENGTH k,si	اقل مقاومة شد MINIMUM TENSILE STRENGTH k,si	اقل مقاومة خضوع Minimum YIELD STRENGTH k,si	المادة MATERIAL	علامة الرأس
1	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low or medium carbon قليل او متوسط الكربون	
2	$\frac{1}{4}-\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}-1\frac{1}{2}$	55 33	74 60	57 36	Low or medium carbon قليل او متوسط الكربون	
4	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon. Cold- drawn متوسط الكربون مسحوب على البارد	
5	$\frac{1}{4}-1$ $1\frac{1}{8}-1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Medium carbon. Q&T متوسط الكربون، معالج بالتغطيس	
5.2	$\frac{1}{4}-1$	85	120	92	Low- carbon martensite, Q&T مارتنسايت متوسط الكربون معالج بالتغطيس	
7	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium carbon alloy. Q&T سبيكة متوسطة الكربون معالجة بالتغطيس	
8	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium- carbon alloy Q&T سبيكة متوسطة الكربون معالجة بالتغطيس	
8.2	$\frac{1}{4}-1$	120	150	130	Low- Carbon martensite Q&T مارتنسايت قليل الكربون معالج بالتغطيس	

جدول(5- 6) مواصفات البراغي الفولاذية الانشية حسب الجمعية الامريكية لفحص المواد ASTM.

المرتبة ASTM DESGNATION NO	مدى الحجم SIZE RANGE INCLUSIVE IN	اقل مقاومة دليلية MINIMUM PROOF STRENGTH k,si	اقل مقاومة شد MINIMUM TENSILE STRENGTH k,si	اقل مقاومة خضوع Minimum YIELD STRENGTH k,si	المادة MATERIAL	علامة الرأس
A307	$\frac{1}{4}-1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low carbon قليل الكربون	
A325. Type1	$\frac{1}{2}-1$ $1\frac{1}{8}-1\frac{1}{2}$	55 33	74 60	57 36	Q&T medium carbon قليل او متوسط الكربون معالج بالتغطيس	A325
A325. Type.3	$\frac{1}{2}-1$ $1\frac{1}{8}-1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Medium carbon. Cold-drawn متوسط الكربون مسحوب على البلاد	A325
A354. Grade BD	+ -4				Low- carbon martensite, Q&T مارتنايت متوسط الكربون معالج بالتغطيس	A325 BC
A449	-1 $1\frac{1}{8}-1\frac{1}{2}$ $1\frac{3}{4}-3$	85	120	92	Medium carbon alloy. Q&T سبيكة متوسطة الكربون معالجة بالتغطيس	
A490. type 1	$\frac{1}{2}-1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy Q&T سبيكة متوسطة الكربون معالجة بالتغطيس	A490 A490
A490. type 3		130	150	130		

إنّ مواصفات البراغي حسب ASTM تتعامل مع الأسنان القصيرة وذلك أنّ معظم هذه البراغي تستخدم في الوصلات الإنشائية والمعرضة لأحمال القص، كما أنّ قصر طول السن يزيد من مساحة الساق.

أمّا مواصفات البراغي المترية فتعطي في جدول(6- 6).

المرتبة Property Class	مدى الحجم SIZE RANGE INCLUSIVE	اقل مقاومة دليلية MINIMUM PROOF STRENGTH Mpa	اقل مقاومة شد MINIMUM TENSILE STRENGTH Mpa	اقل مقاومة خضوع Minimum YIELD STRENGTH Mpa	المادة MATERIAL	علامة الراس
4.6	M5-M36	22.5	400	240	Low or medium carbon قليل او متوسط الكربون	4.6
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Low or medium carbon قليل او متوسط الكربون	4.8
5.8	M5-M24	380	520	420	Low or medium carbon قليل او متوسط الكربون	5.8
8.8	M16-M36	600	830	660	Medium carbon. Cold- drawn متوسط الكربودن مسحوب على البلاد	8.8
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Mediun carbon. Q&T متوسط الكربون، معالج بالتغطيس	9.8
10.9	M5-M36	830	1040	940	Low- carbon martensite, Q&T مارتنايت متوسط الكربون معالج بالتغطيس	10.9
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Medium carbon alloy. Q&T سبيكة متوسطة الكربون معالجة بالتغطيس	12.9

7 .6 وصلات الشد- الحمل الخارجي:

عند دراسة ما يحدث عند تطبيق حمل شد خارجي P على وصلة البرغي كما في شكل(12- 6)،

من المفترض أن قوة الربط والتي سوف نسميها الحمل المسبق F_i سيتم تطبيقها بالشكل الصحيح عند شد العزقة قبل تطبيق القوة P.

حيث:

F_i: الحمل المسبق.

P: حمل شد خارجي.

P_b: جزء الحمل P الذي يحمله البرغي.

P_m: جزء الحمل P الذي يحمله الأعضاء.

$F_b = P_b + F_i$ = محصلة حمل البرغي.

$F_m = P_m - F_i$ = محصلة حمل الأعضاء.

الحمل P هو حمل شد يسبب تمدداً أو إستطالة في الوصلة مسافةً مقدارها δ . يمكن أن ينسب هذا التمدد للصلابة حيث k ثابت الصلابة ناتج قسمة القوة المؤثرة على التمدد(الإستطالة) كما يلي:

$$\delta = \frac{P_b}{K_b}$$

كما أنّ:

$$\delta = \frac{P_m}{K_m}$$

أو:

$$P_b = P_m \frac{K_b}{K_m}$$

وحيث أنّ:

$$P = P_b + P_m$$

$$P_b = \frac{K_b P}{K_b + K_m}$$

وبالتالي فإنّ محصلة حمل البرغي هي:

$$F_b = P_b + F_i = \frac{K_b P}{K_b + K_m} + Fi \qquad F_m < O$$

كما أنّ محصلة حمل الأعضاء في الوصلة هي:

$$F_m = P_b - F_i = \frac{K_m P}{K_b + K_m} - Fi \qquad F_m < O$$

تبقى هذه النتائج صالحة للإستخدام ما دام حمل الربط مؤثراً على الأعضاء.

يوضح الجدول(7- 6) بعض المعلومات المتعلقة بثوابت الصلابة لكل من البرغي والأعضاء، حيث أن مقبض الوصلة مكون فقط من عضوين ولا يحتوي على فلكات، وتشير النسب(C) و(C- 1) إلى عوامل القوة P في المعادلتين الأخيرتين، وتصف هذه النسب جزءاً من الحمل الخارجي المحمولة بواسطة البرغي وجزءاً محمولاً بواسطة الأعضاء، على التوالي.

وفي جميع الحالات تحمل الأعضاء أكثر من 80% من الحمل الخارجي، جدول(7- 6) صلابة البراغي والأعضاء.

STIFFNESSES. MLB/ in				
BOLT GRIP. in(مقبض البرغي)	K_b	K_m	C	1-C
2	2.57	12.69	0.168	0.832
3	1.79	11.33	0.136	0.864
4	1.37	10.63	0.114	0.886

حيث:

$$C = \frac{K_b}{k_b + k_m}$$

C: الجزء المحمول من القوة P بواسطة البرغي.

$$1 - C = \frac{k_m}{k_b + k_m}$$

C- 1: الجزء المحمول من القوة P بواسطة الأعضاء.

6.8 الحمل المسبق للبرغي- التحميل الإستاتيكي:

Bolt Preload – static loading

من المعادلات السابقة:

$$F_b = \frac{K_b p}{k_b + k_m} + F_i = CP + F_i$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

حيث: C: ثابت الوصلة

كما أنّ:

$$F_m = (1-C)P - Fi$$

يمكن إيجاد إجهاد الشد في البرغي بقسمة طرفي معادلة محصلة حمل البرغي على مساحة إجهاد الشد A_t كما يلي:

$$\sigma_b = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t}$$

لكنّ القيمة المحددة لإجهاد σ_b هي مقاومة الشد الدليلية δ_p، بإدخال عامل الحمل n أو عامل الأمان تصبح المعادلة كما يلي:

$$\frac{Cnp}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} = S_p$$

أو:

$$n = \frac{S_p A_t - F_i}{CP}$$

عندما تكون قيمة $n > 1$ فهذا يؤكّد على أنّ إجهاد الشد في البرغي أقل من المقاومة الدليلية(أي أنّ الوصلة في أمان).

ومؤشرا آخر على أمان الوصلة هو أن يكون الحمل الخارجي أقل من الحمل المطلوب لإنفصال الأعضاء في الوصلة، وإذا حدث الإنفصال في الوصلة فإنّ الحمل الخارجي الكلي سيقع تاثيره على البرغي.

على إفتراض أنّ P_O هي قيمة الحمل الخارجي الذي سيسبب إنفصال الوصلة.

فعند الإنفصال تكون $F_m=0$ وعليه فإنّ:

$$0(1-C)P_o - F_i =$$

وتكون قيمة عامل الأمان n الذي يحمي الوصلة من الإنفصال:

$$n = \frac{P_o}{P}$$

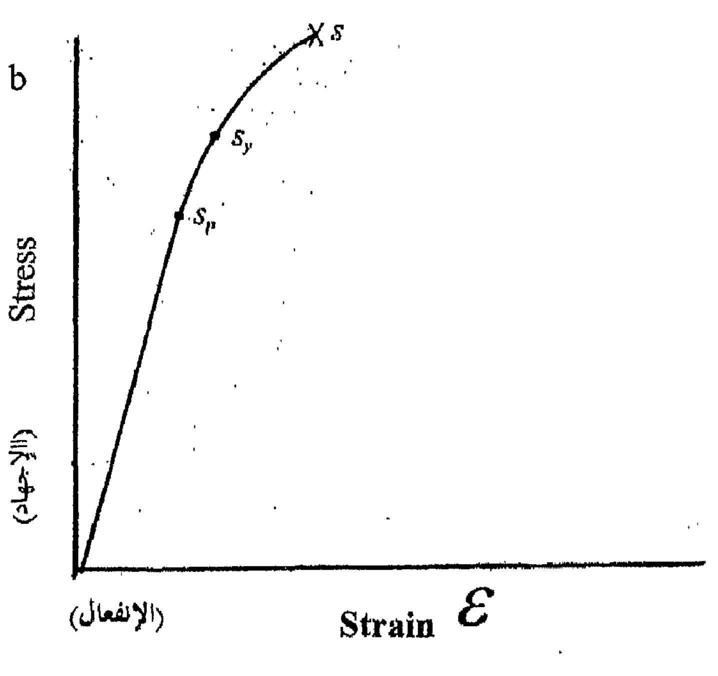
وبتعويض قيمة $P_o = np$ نستنتج أنّ:

$$\frac{Fi}{P(1-C)} n =$$

ويوضح الشكل(15- 6) منحنى(الإجهاد – الإنفعال) لبرغي ذي معدن جيد، من الملاحظ أنّه لا توجد نقطة خضوع واضحة ومحددة وأنّ المنحنى يسير بشكل سلس حتى نقطة الإنهيار(الكسر)، والتي تتوافق مع مقاومة الشد.

وهذا يعني أنّه مهما كان مقدار التحميل المسبق للبرغي فإنّ البرغي سوف يحتفظ بقدراته على تحمل الحمل، وهذا ما يجعل البرغي مشدوداً ويحدد مقاومة الوصلة.

إنّ الشد المسبق للبرغي يمثل عضلة الوصلة ومقدار هذا الشد يُحدد بمقدار مقاومة البرغي، وإذا لم تتم الإستفادة من مقاومة الطول الكامل للبرغي في تطوير الشد المسبق له فهذا يؤدي إلى وصلة ضغيفة وهدر للمال.



(15- 6) منحنى(الإجهاد- الإنفعال) لمعدن برغي

يمكن شد البراغي ذات الجودة العالية مسبقاً إلى المدى اللدن لإعطاء مقاومة أكبر، إنّ عزم اللّي المستخدم في شد البرغي يزيد من قيمة إجهادات الشد الرئيسية، وهذا العزم يتم حمله بواسطة الإحتكاك في رأس البرغي والعزقة، وخلال الوقت يحدث إرتخاء ويقل الشد في البرغي تدريجياً، وأحياناً قد يسبب هذا العزم كسر للبرغي أثناء الشد.

للتحميل المسبق تستخدم العلاقات التالية:

$$F_i = \begin{cases} 0.75\,F_p & \text{للوصلات متكررة الإستخدام} \\ 0.9\,F_p & \text{للوصلات الدائمة} \end{cases}$$

حيث F_p هي الحمل الدليلي(Proof Load) ويتم الحصول عليه من العلاقة:

$$F_p = A_t S_p$$

حيث: S_p هي المقاومة الدليلية ويتم الحصول عليها من الجداول(4-6) و(5- 6) و(6- 6)، أمّا للمعادن غير الفولاذ تستخدم قيمة تقريبية.

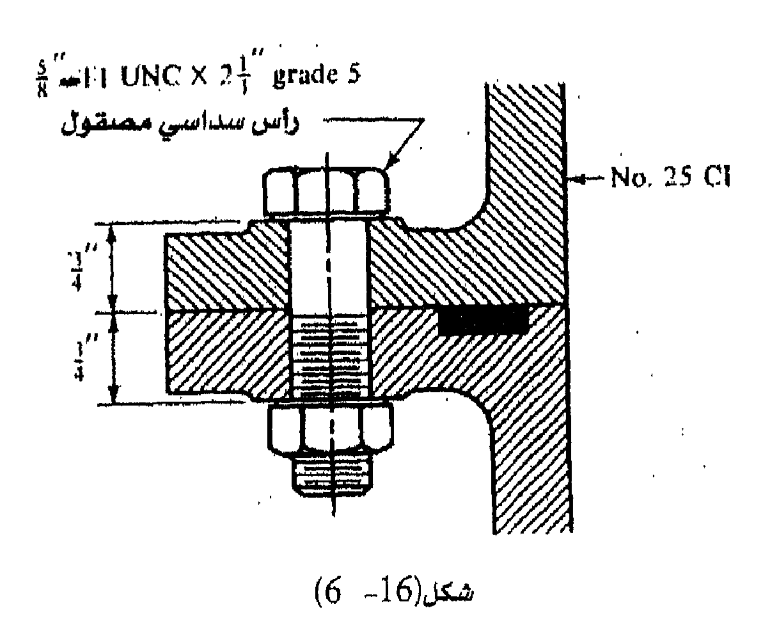
كما يلي:

$$S_p = 0.85 S_y$$

مثال(2): يمثل الشكل(16- 6) مقطع من إسطوانة ضغط عالٍ، يراد إستخدام عدد من البراغي مقداره N لمقاومة قوة فصل مقدارها 36Kip، إذا علمت أنّ معامل مرونة البرغي 30×10^3Ksi، ومعامل مرونة الأعضاء 12Msi

أ. أوجد ثابت الصلابة ومقدار الثابت C.

ب. أوجد عدد البراغي اللازمة، إذا علمت أنّ عامل الأمان n =2، وذلك لإعادة إستخدام البراغي في الوصلات.



شكل(16- 6)

الحل:

أ. يتم حساب ثابت الصلابة للبرغي كما يلي:

$$k_b = \frac{AE}{l} = \frac{\pi d^2 E}{4l} = \frac{\pi (0.625)^2 \times 30}{4 \times 1.5}$$

$$= 6.13 Mlb/in$$

حيث: أنّ طول مقبض البرغي $2(\frac{3''}{4} \times 1 = 1.5in)$.

ولإيجاد ثابت الصلابة للأعضاء نستخدم العلاقة التالية:-

$$K_m = \frac{0.577\pi Ed}{2Ln\left(5\dfrac{0.577l + 0.5d}{0.577l + 2.5d}\right)}$$

$$= \frac{0.577\pi(12)(0.625)}{2Ln\left[5\dfrac{0.577(1.5) + 0.5(0.625)}{0.5771(1.5) + 2.5(0.625)}\right]}$$

$$\therefore K_m = 7.67 Mlb/in$$

ولإيجاد الثابت C نستخدم العلاقة التالية:

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m} = \frac{6.13}{6.13 + 7.67} = 0.444$$

ب. من جدول(2- 6) و(4- 6) نحصل على $A_t = 0.226in^2$ وقيمة المقاومة الدليلية $S_p= 85Ksi$، ومنها يمكن إيجاد قيمة الحمل المسبق كما يلي:

$$F_i= 0.75A_t S_p = 0.75(0.226)(85)$$

$$= 14.4Kip$$

ولإيجاد عدد البراغي N:

$$n = \frac{S_p A_t - F_i}{C(F/N)}$$

أو

$$N = \frac{CnF}{S_p A_t - F_i}$$

$$N = \frac{0.444(2)(36)}{85(0.226) - 14.4} = 6.65$$

وهكذا يمكن إستخدام7براغي لنكون في الجانب الآمن، أي أنّ البراغي اللازم إستخدامها لمقاومة الحمل المؤثر هي7 =N.

6.9 الوصلات المحشوّة:(Gasketed Joints)

إذا وضعت حشوة(gasket) ضمن الوصلة، يمكن إيجاد ضغط هذه الحشوة P كما يلي:

$$P = \frac{-F_m}{A_g / N}$$

حيث:

F_m، محصلة الحمل المؤثر على الأعضاء.

A_g: مساحة الحشوة.

N: عدد البراغي المستخدمة.

وباستخدام عامل تصميم يمكن إستخدام العلاقة التالية:

$$F_m = (1-C)\, nP - Fi$$

من المهم عند إستخدام الحشوات إنتظام الضغط، ويمكن تحقيق هذا الأمر من خلال توزيع البراغي بأبعاد مناسبة بحيث لا يزيد البعد بين كل برغيين عن ستة أضعاف قطر البرغي، ولكن لإعطاء خلوص لمفتاح الربط يكون البعد المناسب بين كل برغيين على الأقل ثلاثة أضعاف قطر البرغي.

يمكن إستخدام علاقة تقريبية لحساب الفراغات بين البراغي المرتبة بشكل دائري كما يلي:

$$3 \le \frac{\pi D_b}{Nd} \le 6$$

حيث:

D_b: قطر الدائرة المراد توزيع البراغي على محيطها.

N: عدد البراغي.

d: قطر البرغي.

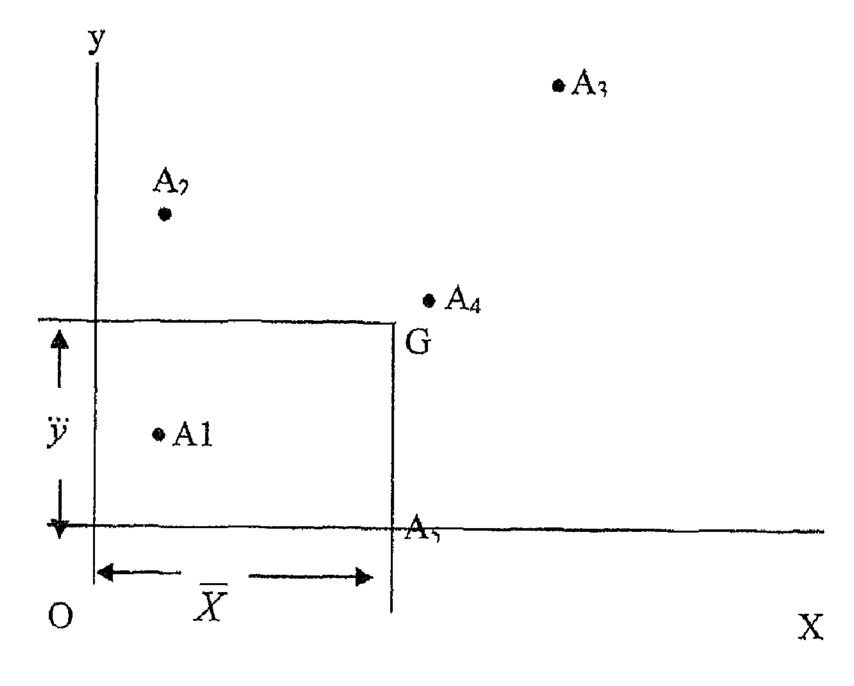
6.10 مراكز ثقل مجموعات البراغي:

يمثل الشكل(17- 6) مجموعة مساحات لخمسة براغي مختلفة، حيث أنّ هذه البراغي ذات أقطار مختلفة من أجل تحديد قوى القص المؤثرة على كل برغي من الضروري معرفة موقع مركز الثقل لمجموعة البراغي.

حيث يتم تحديد إحداثيات مركز الثقل كما يلي:

$$\overline{X} = \frac{\sum_{1}^{n} A_i x_i}{\sum_{1}^{n} A_i} = \frac{A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_4 X_4 + A_5 X_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}$$

$$\overline{y} = \frac{\sum_{1}^{n} A_i x_i}{\sum_{1}^{n} A_i} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4 + A_5 y_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}$$



شكل(17- 6)

الأسئلة:

1) برغي قدرة قطره 25mm وخطوة سنه 5mm، أوجد ما يلي:

أ. عمق السن، عرض السن، قطر الجذر، والقطر المتوسط، والتقدم المحوري، علماً أن السن مربع.

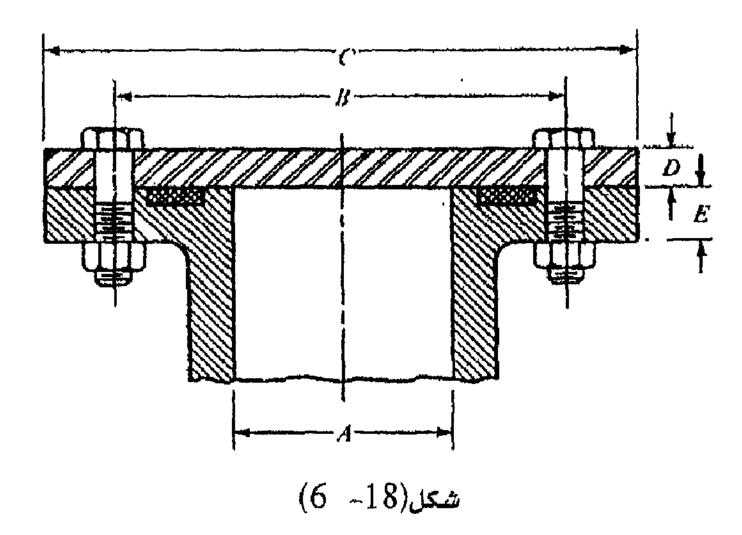
ب. أعد حل الفرع(a) معتبراً أنّ السن أكم.

2) برغي قدره أحادي الباب، قطره 25mmوخطوة سنه 5mm، إذا علمت أنّ قوة مقدارها 6KN، تؤثر عليه، وأنّ معامل الإحتكاك للحلقة($\mu_c = 0.05$) ومعامل إحتكاك السن($\mu = 0.08$)، وأنّ قطر الحلقة الإحتكاكي d_c= 40mm، أوجد الكفاءة الكلية والعزم اللازم لرفع وخفض الحمل(أي شد وفك البرغي).

3) شكل(18- 6) يوضح وصلة لرأس اسطوانة ضغط يستخدم فيها 10براغي وحشوة(Gasket)، إذا علمت أنّ قطر الحشوة الفعال هو 150mm، والأبعاد الأخرى كما يلي:

A= 100mm, B= 200mm, C= 300mm, D= 20mm, E= 25mm.

وتُستخدم هذه الإسطوانة لتحمل ضغط أستاتيكي مقداره 6Mpa، وانّ البراغي من صنف(8.8) وقطر كل منها 12mm، أوجد عامل الأمان n؟



شكل(18- 6)

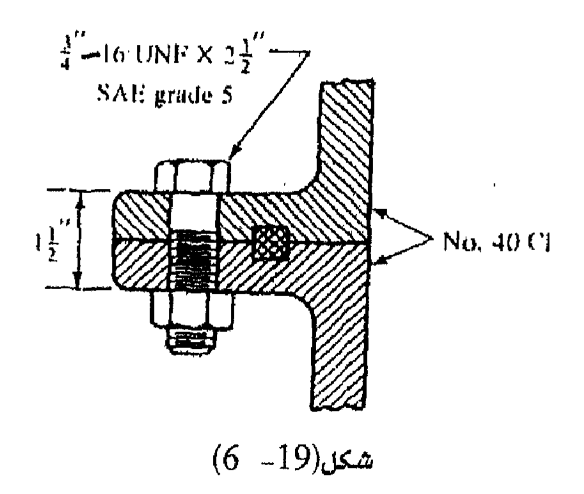
4) برغي ذو قبعة قطره $\frac{3}{4}in$ صنف 5 يستخدم مع عزقة لتثبيت هيكل ماكنة من حديد الزهر، إذا علمت أن سمك العزقة 0.065in وأنّ معامل مرونة البرغي 14Msi وسمك القبعة $\frac{1}{4}in$ وأنّ معامل مرونة الهيكل 14Msi وأنّ طول البرغي هو 1in، أوجد ثابت المرونة للبرغي K_b والأعضاء K_m وكذلك الثابت C.

5) في مقطع الوصلة المبيّن في الشكل(19- 6) والمحملة بقوة $P = 6Kip$، إذا علمت أنّ معامل مرونة الأعضاء $E_m = 16Msi$، وتمّ تحميل البراغي بحمل مسبق مقداره $F_i=25Kip$ لكل برغي، كذلك معامل مرونة البرغي هي $E_b= 30Msi$.

أ. عند إستخدام فلكة سمكها 0.134in تحت رأس البرغي والعزقة، ما هو الطول المناسب للبرغي.

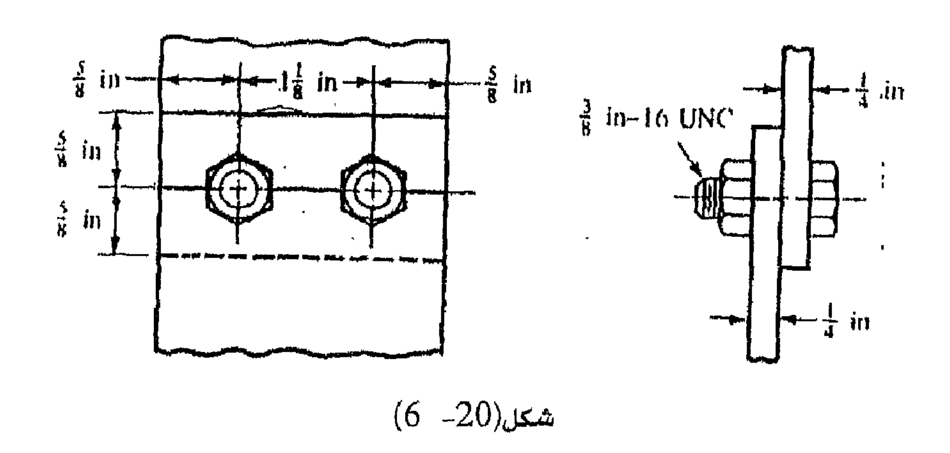
ب. أوجد K_m، K_b، والثابت C.

ج. أوجد عامل الأمان لحماية الوصلة من الحمل الدليلي.



شكل(19- 6)

6) في الوصلة المبينة في الشكل(20- 6)، حيث أنّ البراغي المستخدمة من صنف SAE5، إذا علمت أنّ معامل مرونة الأعضاء $E_m = 30Msi$، إذا علمت أنّ القوة المؤثرة على الوصلة مقدارها $F = 4000\ Lb$ كما أنّ معامل مرونة البرغي $E_b = 30\ Msi$ أوجد عامل الأمان.



شكل(20- 6)

تصميم السيور والسلاسل

Design of Belts and Chains

تصميم السيور والسلاسل

مقدمة:

تعتبر السيور والسلاسل والعناصر الميكانيكية المرنة الأخرى من العناصر المستخدمة في نقل الحركة والقدرة عبر مسافات طويلة نسبياً وأحياناً تستخدم هذه العناصر كبديل للتروس، الأعمدة، المحامل وبعض وسائل نقل الطاقة.

وإنّ استخدام هذه العناصر أيضاً يسهل التصميم ويقلل الكلفة، وبما أنّ هذه العناصر مرنة وطويلة نوعاً ما فإنها تلعب دوراً هاماً في امتصاص الأحمال الصدمية ولها أثر مخمّد وعازل للاهتزازات.

معظم العناصر المرنة لها عمر محدود، حيث من المهم فحص هذه العناصر باستمرار ضد الإهتراء، وفقدان المرونة، ويجب استبدال هذه العناصر عند أول مؤشر على كلفها.

7.1 السيور(Belts):

هناك أربعة أنواع رئيسية للسيور الناقلة للحركة كما هو مبين في جدول(1- 7).

جدول(1- 7) الأنواع الرئيسية للسيور وبعض مواصفاتها.

نوع السير	الشكل	مدى الحجم	المسافة المركزية
مسطح		$t=\begin{cases}0.03\,to\,0.20\,in\\0.75\,to\,5\,mm\end{cases}$	لا يوجد نهاية عظمى
دائري		$d=\frac{1}{8}\,to\,\frac{3}{4}$	لا يوجد نهاية عظمى
شكل V		$b=\begin{cases}0.31\,to\,0.91\,in\\8\,to\,19\,mm\end{cases}$	محددة
توقيت		P = 2mm and up	محددة

تستخدم البكرات المتوّجة(Crowned Pulleys) للسيور المسطحة، أمّا البكرات المحددة أو المثلّمة(Sheaves) فتستخدم للسيور الدائرية وشكل(V).

كما أنّ سيور التوقيت(Timing belts) تحتاج إلى عجلات مسننة، وفي جميع الحالات يجب أن تكون محاور البكرات منفصلةً بمسافة معينة عن بعضها البعض، تعتمد على نوع السير وحجمه، ومن المواصفات الأخرى للسير هي:

- يمكن استخدامها لمسافات مركزية طويلة.
- ما عدا سير التوقيت، يحدث دائماً انزلاقا وتزحف في السير، ولذلك فإن نسبة السرعة الزاوية بين العمود القائد والعمود المنقاد لا تكون ثابتة ولا حتى مساوية لنسبة قطري البكرتين.
- في بعض الحالات تستخدم بكرة وسيطة أو بكرة شد من أجل ضبط المسافة بين المركزين والتي يحدث فيها خلل نتيجة لقدم السير أو تركيب سير جديد.

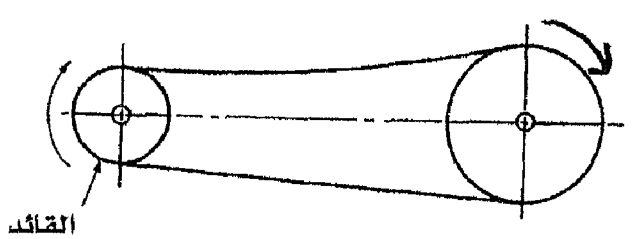
- **أنواع أنظمة السيور:**

يمكن نقل القدرة من عمود إلى آخر باستخدام أنظمة السيور التالية:

1. نظام السير المفتوح(Open- belt drive)
2. نظام السير المتقاطع(Crossed – belt drive)

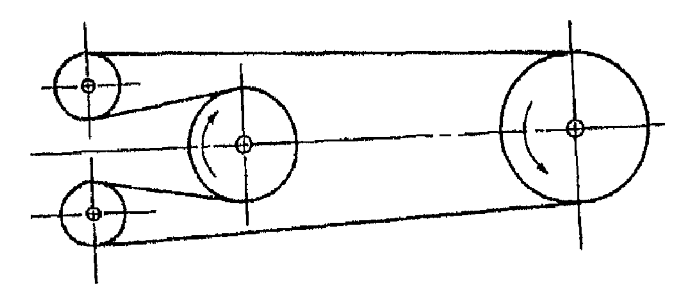
- **نظام السير المفتوح:**

في هذا النظام تتحرك البكرتان في نفس الاتجاه كما في الشكل(1- 7) بحيث يظهر الارتخاء بشكل واضح في السير، عندما يدور السير يكون الجزء السفلي مشدوداً(tight side) فيما يكون الجزء العلوي مرتخياً(Slack side)، هذا إذا كان السير من النوع المسطح أمّا إذا كان السير من الأنواع الأخرى فيمكن أن يكون الارتخاء في الجزء العلوي أو السفلي من السير.



شكل(1- 7) نظام السير المفتوح حركة موّحدة

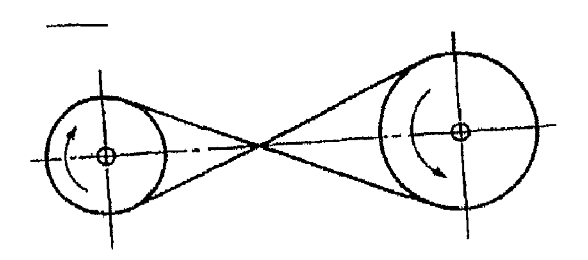
ويمكن أن يكون النظام المفتوح أيضاً كما في شكل(2- 7) والذي يتضمن حركة دورانية متعاكسة للبكرتين.



شكل(2- 7) نظام السير المفتوح حركة متعاكسة

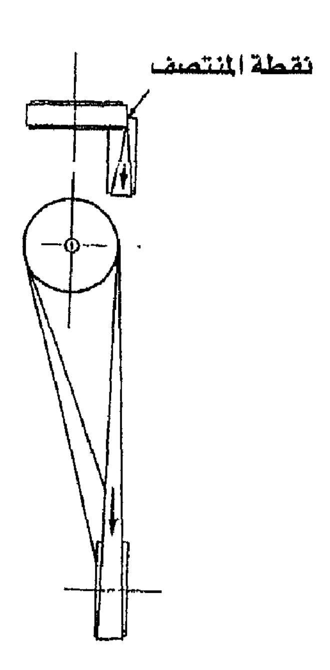
- نظام السير المتقاطع:

في هذا النظام يتقاطع السير من أجل الحصول على حركة دورانية متعاكسة للبكرات كما في الشكل(3- 7)، يجب مراعاة فصل الجزأين المتقاطعتين من السير حتى لا يحدث احتكاك والذي قد يسبب انقطاع السير.



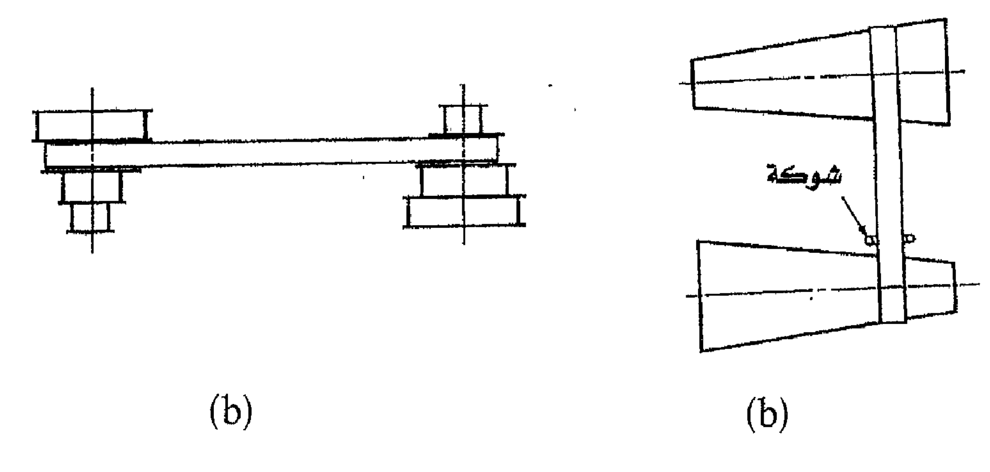
شكل(3- 7) نظام السير المفتوح حركة متعاكسة

ومن الأمثلة الأخرى على السير المتقاطع النظام المستخدم في الشكل (4- 7) والذي يمثل بكرتين خارج المستوى يحركهما سير مسطح، حيث تكون الأعمدة هنا في حالة تعامد، يجب تركيب البكرات بحيث يغادر السير كل بكرة في منتصف مستوى وجه البكرة الأخرى.



شكل(4- 7) نظام سير متقاطع لبكرتين خارج المستوى

كما يوضح الشكل(5- 7) نوعين من السيور متغيرة السرعة حيث أن النوع(b) يستخدم فقط حالة السيور شكل V والسيور الدائرية لأنّه يحتاج إلى بكرات محددة(Sheaves).



شكل(5- 7) بعض أنواع السيور متغيرة السرعة

- تصنع السيور المسطحة من اليوريثان أو المطاط المدعّم بأسلاك حديدية أو خيوط نايلون وذلك لتحمل الشد المؤثر عليها.

ويكون أحد السطحين أو كلاهما مغطى بطبقة لتقليل الاحتكاك.

تعتبر السيور المسطحة من النوع الهادئ والفعال عند السرعات العالية، ويمكنها نقل كم كبير من القدرة على مسافات مركزية طويلة.

عادةً يتم شراء السيور المسطحة على شكل لفائف ويتم قطعها ووصل أطرافها بواسطة عدد خاصة لدى المصنع، يتم استخدام سَيْرين أو أكثر كبديل لسير عريض لاستخدامها في نظام النقل(Conveyor).

- تصنع السيور شكل V من المطاط المدعّم بنسيج، عادةً ما يكون هذا النسيج من القطن أو الرايون أوالنايلون.

وتستخدم هذه السيور مع البكرات المخددة(ذات مجرى) ولمسافات قصيرة، وتعتبر هذه السيور أقل فعالية من السيور المسطحة.

- أمّا سيور التوقيت فتصنع من المطاط المدعّم بأسلاك الحديد ولها أسنان تلائم العجلات المسننة المراد تركيبها عليها.

وهذه السيور لا تتعرض للانزلاق أو التمدد، كما أنها تقوم بنقل القدرة على سرعة دورانية ثابتة.

وحقيقة وجود الأسنان على هذا السير جعلته متميزاً في الاستخدام عن غيره من السيور، ومن هذه الميزات:

1. لا يوجد قيود على السرعات، حيث يمكن الحصول على سرعات عالية أو سرعات منخفضة.
2. لا يوجد حاجة للشد الابتدائي في السير وهذا أدى إلى ثبات المسافة بين المركزين.

أمّا مساوئ هذه السيور هي:

1. غلاء الثمن.
2. الحاجة إلى فتح الأسنان في السير.
3. حدوث اهتزازات في السير نتيجة تعشيق أسنانه مع العجلات المسننة.

7.2 السيور المسطحة والدائرية:

تتكون السيور المسطحة الحديثة من قلب قوي ومرن، وهذه السيور ذات كفاءة حوالي 98% والمشابهة لأنظمة التروس.

من ناحية أخرى فإنّ كفاءة السير شكل V تتراوح ما بين 70- 96%.

السيور المسطحة ذات مستوى متدني من الضجيج، كما أنها تمتص الاهتزازات أكثر من السيور شكل V والتروس.

وعند استخدام نظام السير المفتوح كما في شكل(1- 7) يمكن إيجاد زوايا التلامس كما يلي:

$$\theta_d = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{D-d}{2C}\right)$$

$$\theta_D = \pi + 2\sin^{-1}\left(\frac{D-d}{2C}\right)$$

حيث:

D: قطر البكرة الكبيرة.

d: قطر البكرة الصغيرة.

C: المسافة بين المركزين.

θ: زاوية التلامس.

يمكن إيجاد طول السير كما يلي:

$$L=\left[4C^2-(D-d)^2\right]^{1/2}+\frac{1}{2}\left[D\theta_D+d\theta_d\right]$$

ويمكن اشتقاق مجموعة أخرى من المعادلات لنظام السير المتقاطع حيث تكون زاوية الإحاطة كما يلي:

$$\theta=\pi+2\sin^{-1}$$

ومن هنا يتم إيجاد طول السير في النظام المتقاطع كما يلي:

$$L=\left[4C^2-(D+d)^2\right]^{1/2}+\frac{\theta}{2}(D+d)$$

إنّ التغيّر في شد السير نتيجة قوى الاحتكاك بين السير والبكرة سيسبب تمدداً في السير أو تقلّصاً ويتحرك بالنسبة لسطح البكرة.

إن سبب هذه الحركة هو التزحف المرن ويكون مترافقاً مع الإحتكاك الإنزلاقي تسبب السير والبكرة، وحركة البكرة القائدة من خلال زاوية التلامس تسبب نقلاً للقدرة، بحيث يتحرك السير ببطء أكبر من سرعة البكرة السطحية بسبب الزحف المرن.

تنتج زاوية التلامس من القوس الفعّال ومن خلاله يتم نقل القدرة. يلامس السير أولاً البكرة القائدة من جهة الشد في السير بقوة شد F_1 وسرعة V_1، وهي نفس السرعة السطحية للبكرة، ثمّ يمر السير بعد ذلك خلال القوس غير الفعال (idle) بحيث لا تتغير قيمة F_1 ولا قيمة V_1، ثمّ يحدث التزحف أو الإنزلاق فيحدث تغيّر في الشد تبعاً لوجود قوى الإحتكاك، وفي نهاية القوس الفعال يغادر السير البكرة مع الجزء المرتخي بحيث تكون قوة الشد فيه F_2 وسرعته V_2.

تعطى العلاقة بين قوة الشد في الجزء المشدود من السيرF_1 وقوة الشد في الجزء المرتخيF_2 كما يلي:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{f\theta}$$

حيث:

p : معامل الإحتكاك.

θ : زاوية التلامس.

أمّا القدرة المنقولة فتكون كما يلي:

$$F_1 - F_2(V)=P$$

حيث:

p: القدرة(Watt)

F_1: قوة الشد في الجزء المشدود(N)

F_2: قوة الشد في الجزء المرتخي(N)

V: سرعة السير(m/s)

وعليه تعطى القدرة المنقولة بالحصان الميكانيكي كما يلي:

$$H = \frac{(F_1 - F_2)V}{33000}$$

وحيث أنّ قوة الشد F_1 و F_2 بوحدة Lb والسرعة ft/ min لكن عند أخذ قوة الطرد المركزي بعين الاعتبار تكون قيمتها:

$$F_c = mv^2$$

حيث:

m: كتلة السير لكل وحدة طول.

V: وحدات الطول لكل ثانية.

وعند اعتبار قوة الطرد المركزي نحصل على ما يلي:

$$\frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = e^{f\theta}$$

على اعتبار أنّ فوق شد ابتدائية تنشأ في السير عند تركيبه مقدارها F_i، فعند نقل القدرة تدور البكرة جاعلةً الجانب المشدود من السير يتمدد والجانب المرتخي يتقلص وعندها:

$$F_1 = F_i + \Delta F$$

$$F_2 = F_i - \Delta F$$

ويمكن إيجاد قوة الشد الابتدائية من العلاقة التالية:

$$Fi = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

عندما لا يكون هناك قدرة منقولة، يتساوى الشد في جانبي السير بحيث F_1 $F_2 + F_i =$، وعند إضافة حمل، تنتقل بعض القدرة وتزداد قيمة F_1 تقل قيمة F_2

تدريجياً حتى تصل إلى الصفر، وعند هذه النقطة تصبح $F_1 = 2F_i$ والتي هي أقصى قيمة شد في السير، لذا فإنّ الطريقة الوحيدة لنقل القدرة هي زيادة الشد الابتدائي في السير.

وبتعويض $F_2 = 0$ في معادلة القدرة السابقة ينتج:

$$H = \frac{F_i V}{16500}$$

وهذه المعادلة تعتبر الأساسية في التصميم للسيور المسطحة والدائرية، والشكل العام لمعادلة التصميم والتي تعتمد على حساب القدرة بالحصان الميكانيكي هي:

$$H = \frac{C_p C_v F_a V}{16500 Ks}$$

H: القدرة المنقولة بالحصان الميكانيكي.

C_p: عامل تصحيح البكرة.

C_v: عامل تصحيح السرعة.

Fa: الشد المسموح به في السير(Lb).

K_s: عامل الخدمة.

إنّ أقل حجم للبكرة لأنواع مختلفة من السيور يعطى من خلال جدول(2- 7) وجدول(3- 7).

يعبر عامل تصحيح البكرة عن مقدار العزم أو الثني للسير وكيف يؤثر ذلك على عمر السير، لذلك فهي تعتمد على الحجم ومادة السير المستخدمة.

جدول(2- 7) بعض خواص السيور المسطحة والدائرية.

المادة	المواصفات	الحجم	أقل قطر للبكرة	الشد المسموح به لكل وحدة عرض على سرعة 600 ft/ min, lb/ in	الكثافة Lb/in^3	معامل الاحتكاك
Leather	طبقة واحدة	$\frac{11}{64}$ t= $\frac{13}{64}$ t=	3 3½	30 33	0.035-0.045 0.035-0.045	0.4 0.4
جلد	طبقتين	$\frac{18}{64}$ t= $\frac{20}{64}$ t= $\frac{23}{64}$ t=	$4\frac{1}{2}$ 6 9	41 50 60	0.035-0.045 0.035-0.045 0.035-0.045	0.4 0.4 0.4
Polyamide بوليمايد	F=0 1F= F=2 A=2 A=3 A=4 A=5	t=0.03 t=0.05 t=0.07 t=0.11 t=0.13 t=0.20 t=0.25	0.60 1.0 2.4 2.4 4.3 9.5 13.5	10 35 60 60 100 175 275	0.035 0.035 0.051 0.037 0.042 0.039 0.039	0.5 0.5 0.5 0.8 0.8 0.8 0.8
Urethane يورثيان	W=0.5 W=0.75 W= 1.25	t=0.062 t=0.078 t=0.090	جدول (3- 7)	5.2 9.8 18.9	0.038-0.045 0.038-0.045 0.038-0.045	0.7 0.7 0.7
	Round دائري	d= ¼ d= ⅜ d= ½ d= ¾	جدول (3- 7)	8.3 18.6 33.0 74.3	0.038-0.045 0.038-0.045 0.038-0.045 0.038-0.045	0.7 0.7 0.7 0.7

حيث:

d: قطر السير الدائري.

t: سماكة السير.

w: عرض السير.

جدول(3- 7) أقل حجم للبكرة لسير من اليوريثان مسطح أو دائري.

نوع السير	حجم السير in	نسبة سرعة البكرة إلى طول السير revL ft. min		
		UP TO 250	250 TO 499	500 TO 1000
Flat مسطح	0.05x0.062	0.38	0.44	50.0
	0.075x0.078	0.50	0.63	0.75
	1.25x0.090	0.50	0.63	0.75
Round دائري	¼	1.50	1.75	2.00
	⅜	2.25	2.62	2.00
	½	3.00	3.50	4.00
	¾	5.00	6.00	7.00

جدول(4- 7) قيم عامل تصحيح البكرة C_p للسيور المسطحة.

المادة		SMALL- PULLEY DIAMETER. in (قطر البكرة الصغيرة)					
		1.6 TO 4	4.5 TO 8	9 TO 12.5	14, 16	18 TO 31.5	Over 31.5
Leather (جلد)		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Polyamide, (بوليمايد)	F-0	0.95	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	F-1	0.70	0.92	0.95	1.0	1.0	1.0
	F-2	0.73	0.86	0.96	1.0	1.0	1.0
	A-2	0.73	0.86	0.96	1.0	1.0	1.0
	A-3	--	0.7	0.87	0.94	0.96	1.0
	A-4	--	--	0.71	0.80	0.85	0.92
	A-5	--	--	--	0.72	0.77	0.91

ولسير مصنوع من اليوريثان تكون قيمة $C_p = 1$.

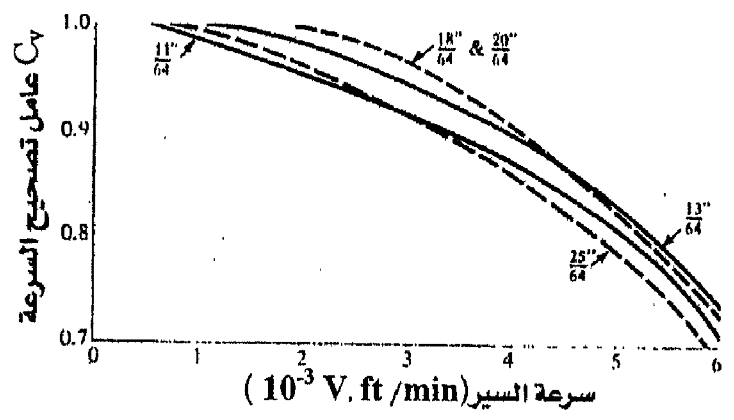
- يجب أن تكون البكرات المستخدمة مع السيور المسطحة متوجة(Crowned)(أي ذات تاج) وذلك لحماية السير من الخروج عن مسار البكرة، إذا كانت بكرة واحدة متوّجة فيجب أن تكون البكرة الأكبر، ولكن يجب أن تكون كلا البكرتين متوّجة حيثما تكون محاور البكرتين في وضع غير أفقي، ويبيّن جدول(5- 7) ارتفاع التاج في كل بكرة.

جدول(5- 7) ارتفاع التاج وأقطار البكرات المستخدمة للسيور المسطحة حسب ISO.

قطر البكرة(ISO) in	ارتفاع التاج in	قطرة البكرة(ISO) in	ارتفاع التاج	
			w≤ 10to in	W>10in
1.65, 2, 2.5	0.012	12.5, 14	0.03	0.03
2.8, 3.15	0.012	12.5, 14	0.04	0.04
3.55, 4, 4.5	0.012	22.4, 25, 28	0.05	0.05
5, 5.6	0.016	31.5, 35.5	0.05	0.06
6.3, 7.1	0.020	40	0.05	0.06
8, 9	0.024	45, 50, 56	0.06	0.08
10, 11.2	0.030	63, 71,80	0.07	0.10

إنّ القيم المعطاة في جدول(2- 7) للشد المسموح به في السير مبنية على سرعة 600ft/ min، ولسرعةٍ أعلى نستخدم مخطط(6- 7) لإيجاد قيمة عامل تصحيح السرعة C_V للسيور الجلدية، أمّا السيور المصنوعة من البوليمايد واليوريثان فتكون قيمة عامل تصحيح السرعة $C_V = 1$.

كما أنّ عامل الخدمة k_s للسيور شكل V والمسطحة والدائرية فيعطى من خلال جدول(11- 7).



شكل(6- 7) عامل تصحيح السرعة للسيور الجلدية

7.3 السيور شكل V Belts (V):

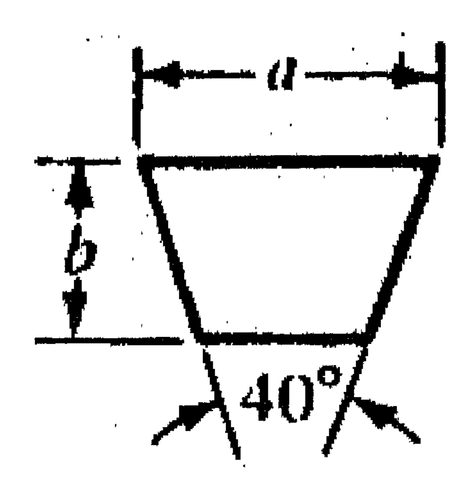
إنّ أبعاد مقاطع السيور شكل V تكون معيارية من خلال المصنع، حيث يتم تسمية كل مقطع بحرف من الحروف الأبجدية للأحجام بوحدة الإنش.

أمّا الأحجام المترية فتستخدم لتسميتها أرقام معينة.

تكون خطوات تصميم هذه السيور بنفس الكيفية للسيور السابقة من حيث الأبعاد وأقل قطر للبكرة، ومدى القدرة لكل مقطع كما هو موضح في جدول (6- 7).

جدول(6- 7) مقاطع السيور شكل(V) القياسية.

مقطع السير	عرض السير(a)	سماكة السير(b)	أقل قطر للبكرة	مدى القدرة بالحصان(hp) لسير واحد أو أكثر
A	½	$\frac{11}{32}$	3.0	$\frac{1}{4}-10$
B	$\frac{21}{32}$	$\frac{7}{16}$	5.4	1-25
C	$\frac{7}{8}$	$\frac{17}{32}$	9.0	15-100
D	1¼	$\frac{3}{4}$	13.0	50-250
E	1½	1	21.6	100 and up



مقطع السير

جدول(7- 7) المحيط الداخلي للسيور شكل(V) القياسية.

مقطع السير	المحيط الداخلي(in)
A	26,31,33,35,38,42,46,48,51,53,55,57,60,62,64,66,6 8,71 75,78,80,85,90,96,105,112,120,128
B	35,38,42,46,48,51,53,55,57,60,62,64,65,66,68,71,7 5,78 79,81,83,85,90,93,97,100,103,103,105,112,120,12 8,131,136 144,158,173,180,195,210,240,270,300,
C	51,60,68,75,81,85,90,96,105,112,120,128,136,144, 158,162 173,180,195,210,240,270,300,330,360,390,420,
D	120,128,144,158,162,173,180,195,210,240,270,30 0,330,360, 390,420,480,540,600,660
E	180,195,210,240,270,300,330,360,390,420,480,54 0,600,660

تكون حسابات طول السير مبنيةً على طول الخطوة، ويتم الحصول على طول الخطوة بإضافة كمية معينة للمحيط الداخلي للسير المأخوذ من جدول(7- 7) وجدول(8- 7) الذي يعط مقدار الكمية المضافة حسب مقطع السير.

جدول(8- 7) الكمية اللازم إضافتها للمحيط الداخلي للحصول على طول الخطوة.

(مقطع السير)	A	B	C	D	E
(الكمية اللازم إضافتها)	1.3	1.8	2.9	3.3	4.5

على سبيل المثال لسير مقطعه B60 يتم إضافة قيمة مقدارها 1.8 من جدول(8- 7) إلى المحيط الداخلي(60in) فيصبح طول الخطوة(60+1.8=61.8 in).

- يتم عمل زاوية الثلم(الأخدود) في البكرة بحيث تكون أقل بقليل من زاوية مقطع السير، وهذا يؤدي بالسير أن ينحشر أو يتوتد داخل الثلم وبالتالي يزيد من الاحتكاك، إنّ القيمة الدقيقة لهذه الزاوية تعتمد على مقطع السير، قطر البكرة وزاوية التلامس، فإذا كانت هذه الزاوية أقل بكثير من زاوية السير، فإنّ قوة زائدة عن الحد سوف تقوم بدفع السير خارج الثلم عندما يغادر السير البكرة.

إنّ اقل قطر للبكرة المثلمة يُعطى في جدول(9- 7)، ولنتائج أفضل يجب أن يؤخذ السير V على سرعة عالية وتعتبر السرعة 4000 ft/min سرعة مناسبة، وقد تحدث بعض المشاكل عند دوران السير بسرعة أعلى من 5000ft/min أو اقل من السرعة1000ft/min بكثير.

لإيجاد الخطوة أو الطول الفعال للسير شكل V تستخدم العلاقة التالية:

$$L_p = 2C + 1.57(D + d) +$$

حيث:

C: المسافة بين المركزين.

D: قطر دائرة الخطوة للبكرة الكبيرة.

d: قطر دائرة الخطوة للبكرة الصغيرة.

L_p: طول الخطوة(الطول الفعال) للسير.

في حالة السيور المسطحة لم تكن هناك حدوداً على المسافة المركزية، أمّا في السيور شكلVفلا ينصح فيها بالمسافات المركزية الطويلة حيث أنّ هذا يؤدي إلى حدوث اهتزازات في الجانب المرتخي من السير وهذا بدوره يقلل من عمر السير.

ويشكل عام يجب أن لا تزيد المسافة بين المركزين عن ثلاثة أضعاف مجموع قطري البكرتين وأن لا تقل عن قطر البكرة الكبيرة.

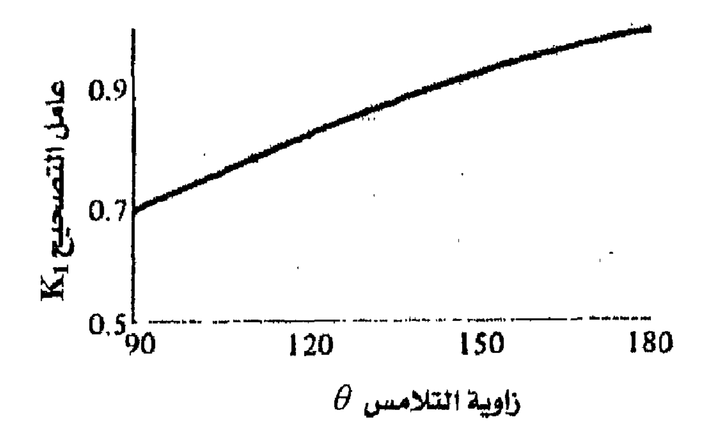
يوضح جدول(9- 7) قدرة السيور شكل V القياسية لأقطار متنوعة للبكرة وسرعات السيور التي توافق عمراً مقبولاً لهذه السيور.

تعتمد هذه القيم على زاوية تلامس مقدارها180° . ولزوايا تلامس أقل، يجب اختزال هذا التصنيف، حيث يستخدم شكل(7- 7) لإعطاء قيم عامل التصحيح K_1، المستخدمة لتقليل القدرة عندما تكون زاوية التلامس أقل من80°.

جدول(9- 7) القدرة(hp) للسيور شكل V القياسية.

مقطع السير	قطر دائرة الخطوة للبكرة in	سرعة السير(ft/min)				
		1000	2000	3000	4000	5000
A	2.6	0.47	0.62	0.53	0.15	
	3.0	0.66	1.01	1.12	0.93	0.38
	3.4	0.81	1.31	1.57	1.53	1.12
	3.8	0.93	1.55	1.92	2.00	1.71
	4.2	1.03	1.74	2.20	2.38	2.19
	4.6	1.11	1.89	2.44	2.69	2.58
	5.0 and up	1.17	2.03	2.64	2.96	2.89
B	4.2	1.07	1.58	1.68	1.26	0.22
	4.6	1.27	1.99	2.29	2.08	1.24
	5.0	1.44	2.33	2.80	2.76	2.10
	5.4	1.59	2.62	3.24	3.34	2.82
	5.8	1.72	2.87	3.61	3.85	3.45
	6.2	1.82	3.09	3.94	4.28	4.00
	6.6	1.92	3.29	4.23	4.67	4.48
	7.0 and up	2.01	3.46	4.49	5.01	4.90
C	6.0	1.84	2.66	2.72	1.87	
	7.0	2.48	3.94	4.64	4.44	3.12
	8.0	2.96	4.90	6.09	6.36	5.52
	9.0	3.34	5.65	7.21	7.86	7.39
	10.0	3.64	6.25	8.11	9.06	8.89
	11.0	3.88	6.74	8.84	10.0	10.1
	12.0 and up	4.09	7.15	9.46	10.9	11.1
D	10.0	4.14	6.13	6.55	5.09	1.35
	11.0	5.00	7.83	9.11	8.50	5.62
	12.0	5.71	9.26	11.2	11.4	9.18
	13.0	6.31	10.5	13.0	13.8	12.2
	14.0	6.82	11.5	14.6	15.8	14.8
	15.0	7.27	12.4	15.9	17.6	17.0
	16.0	7.66	13.2	17.1	19.2	19.0
	17.0 and up	8.01	13.9	18.1	20.6	20.7

E	16.0	8.68	14.0	17.5	18.1	15.3
	18.0	9.92	16.7	21.2	23.0	21.5
	20.0	10.9	18.7	24.2	26.9	26.4
	22.0	11.7	20.3	26.6	30.2	30.5
	24.0	12.4	21.6	28.6	32.9	33.8
	26.0	13.0	22.8	30.3	35.1	36.7
	28.0 and up	13.4	23.7	31.8	37.1	39.1



شكل(7- 7) عامل تصحيح زاوية التلامس k_1

عند استخدام بكرة بسرعة معينة وسير قصير فإنّ عمر هذا السير يكون أقل من سير طويل يستخدم مع نفس البكرة وذلك لأنّ السير القصير يتعرض للحمل عدد كبير من المرات، ولهذا فإنه من الضروري استخدام عامل تصحيح جديد K_2 ويسمى عامل تصحيح طول السير(belt – legth Carrection factor)، تعطى هذه العوامل من خلال جدول(10- 7) لمقاطع وأطوال مختلفة من السيور، يجب ان يضرب هذا العامل بالقدرة(hp) من أجل الحصول على تصحيح القدرة.

جدول(10- 7) عامل تصحيح طول السير K_2

عامل	طول السير(in)				
الطول	A BELTS	B BELTS	C BELTS	D BE;TS	E BELTS
0.85	UP to 35	Up to 46	Up to 75	Up to 128	
0.90	38-46	48-60	81-96	144-162	Up to 195
0.95	48-55	62-75	105-120	173-210	210-240
1.00	60-75	78-97	128-158	240	270-300
1.05	78-90	105-120	162-195	270-330	330-390
1.10	96-112	128-144	210-240	360-420	420-480
1.15	120 and up	158-180	270-300	480	540-600
1.20		195 and up	330and up	540	660

جدول(11- 7) عامل الخدمة K_s

	مصدر القدرة	
نوع الإستخدام	عزم طبيعي	عزم عالٍ أو غير منتظم
(Uniform) منتظم	1.0 to 1.2	to 1.3 1.1
(Light shock)صدم خفيف	to 1.3 1.1	to 1.4 1.2
(Medium shock) صدم متوسط	to 1.4 1.2	to 1.6 1.3
(Heavy shock) صدم ثقيل	to 1.5 1.3	1.5 to 1.8

مثال(1): محرك قدرته 10hp يدور بسرعة 1750rpm، يراد استخدامه لتشغيل مضخة دوارة تعمل 24h لكل يوم، يجب أن تدور المضخة بسرعة 1175rpm، ويجب أن لا تتجاوز المسافة بين المركزين 44in، وانّ قطر البكرة المنقادة محدودة لغاية 11.5in، أوجد أقطار البكرتين، حجم السير وعدد السيور اللازمة.

أعتبر عامل الخدمة $K_s = 1.3$

الحل:

- بما أنّ القدرة = 10hp بالرجوع إلى جدول(6- 7) نختار نوع مقطع السير حيث يكون هنا النوع B.
- بما أنّ البكرة المنقادة يجب أن لا يتجاوز قطرها 11.5in، يكون أقل حجم مباشر هو 11in.
- وبما أنّ عامل الخدمة $K_s = 1.3$ تكون القدرة التصميمية هي:

$$H = 10 \times 1.3 = 13hp$$

ولإيجاد قطر البكرة الصغيرة نستخدم العلاقة:

$$Dn_1 = dn_2$$

$$d = \frac{Dn_1}{n_2} = 11 \times \frac{1175}{1750} = 7.4in$$

ويعتبر هذا القطر هو القطر القياسي لدائرة الخطوة.

والآن يمكن إيجاد طول الخطوة(الطول الفعال) للسير كما يلي:

$$L_p = 2C + 1.57(D+d) + \frac{(D-d)^2}{4C}$$

$$= 2(44) + 1.57((11+7.4) + \frac{(11-7.4)^2}{4\times(44)} = 112.97in$$

ويكون أقرب طول لسير نوع مقطعة B هو B112.

ومن جدول(7- 7) و(8- 7) نجد طول الخطوة ويكون:

112 + 1.8 = 113.8in

وعليه تكون سرعة السير الخطية:

$$V = \frac{\pi dn}{12} = \frac{\pi(7.4)(1750)}{12} = 3390 ft/\min$$

ومن جدول(9- 7) نجد القدرة المحسوبة لكل سير فتكون:

H= 4.66hp/Belt

ولإيجاد زاوية التلامس للبكرة الصغيرة θ_d:

$$\theta_d = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{D-d}{2C}\right)$$

$$\theta_d = 3.14 - 2\sin^{-1}\left(\frac{11-7.4}{2\times 44}\right) = 3.05 rad$$

$$= 175^\circ$$

ومن شكل(7- 7) نجد عامل التصحيح لزاوية التلامس k_1:

$K_1 = 0.99$

ومن جدول(10- 7) نجد عامل تصحيح طول السير K_2:

$K_2 = 1.05$

وبناءً عليه تكون القدرة المصححة لكل سير كما يلي:

$H = 0.99(1.05)(4.66) = 4.85$ hp

ولذلك يكون عدد السيور اللازمة N:

$$N = \frac{13}{7.85} = 2.69$$

∴ عدد السيور اللازمة من نوع B هي ثلاثة سيور.

مثال(2): سير مسطح يستخدم لنقل قدرة، إذا علمت أنّ قطر البكرة الكبيرة 12in وتدور بسرعة 1200rev/min، وتدور البكرة الصغيرة بسرعة 1800 rev/min، وأن المسافة بين المركزين 50in، إذا كان الشد في الجزء المشدود 500lb والشد في الجزء المرتخي 50lb، أعتبر أنّ السير من النظام المتقاطع، صمّم هذا السير بإيجاد كل ما يلي:

1) زاوية التلامس للسير.
2) طول السير.
3) معامل الاحتكاك.
4) القدرة المنقولة P.
5) القدرة المنقولة بالحصان الميكانيكي(H).
6) الشد الابتدائي في السير.

الحل:

1) زاوية التلامس θ:

$$\theta = \pi + 2\sin^{-1}\left(\frac{D+d}{2C}\right)$$

$$Dn_1 = dn_2$$

$$12 \times 1200 = d(1800)$$

$$d = 8in$$

$$\theta = 3.14 + 2\sin^{-1}\left(\frac{12+8}{2(50)}\right) = 3.54rad$$

$$= 203^\circ$$

2) طول السير:

$$L = \left[4C^2 - (D+d)^2\right]^{1/2} + \frac{\theta}{2}(D+d)$$

$$= \left[4(50)^2 - (12+8)^2\right]^{1/2} + \frac{3.54}{2}(12+8)$$

$$= 97.98 + 35.4 = 133.38in \approx 134in$$

3) معامل الاحتكاك:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{f\theta}$$

$$\frac{500}{50} = e^{3.54f}$$

$2.3 = 3.54f$

$f = 0.65$

4) القدرة المنقولة P:

$=(F_1 - F_2)\,V \qquad P$

$$V = \frac{\pi dn}{12} = \frac{\pi \times 8 \times 1800}{12}$$
$$= 3770\,ft/\min$$

P=(500-50) 3770

= 1.7 M Lb. ft/min

5) القدرة المنقولة بالحصان الميكانيكي(H):

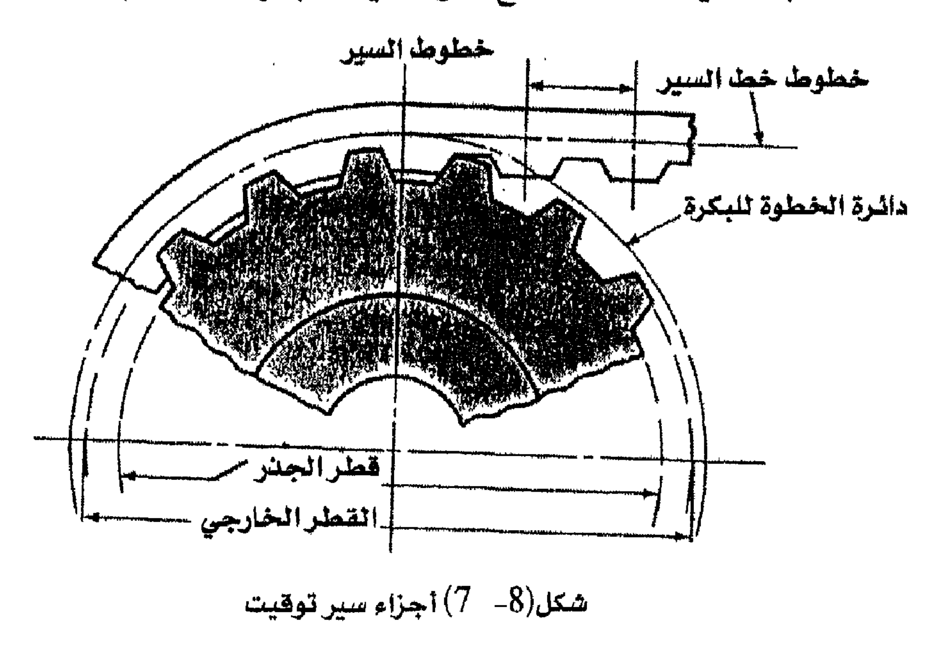
$$\frac{P}{33000} = \frac{1.7 \times 10^6}{33000} = 51.5hp\,\mathrm{H} =$$

6) الشد الابتدائي في السير:

$$Fi = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{500 + 50}{2} = 275lb$$

7.4 سيور التوقيت(Timing Belts):

تصنع هذه السيور من المطاط المدعّم بأسلاك الحديد لتحمّل الشد، ولها أسنان تناسب أخاديد(أسنان) تُقطع على محيط البكرات، كما في شكل(8- 7).



شكل(8- 7) أجزاء سير توقيت

ويغطى هذا السير بطبقة من ألياف النايلون، من ميزات هذا السير أنّه لا يتمدد ولا ينزلق وبالتالي فهو يقوم بنقل القدرة بسرعة دورانية ثابتة، كما أنّه لا يحتاج إلى الشد الابتدائي، يستطيع هذا السير العمل على مدىً واسع من السرعات وله كفاءة تتراوح بين ٪99 97، لا يحتاج إلى التزييت أو التشحيم، ويكون أهدأ من السلاسل.

إنّ أسلاك الحديد المستخدمة في تدعيم السير تكون مرتبة على خط خطوة السير، وبالتالي يكون طولها مساوٍ لطول الخطوة.

يوضح جدول(12- 7) الخطوات القياسية لسيور التوقيت مع رموز الخدمة المستخدم.

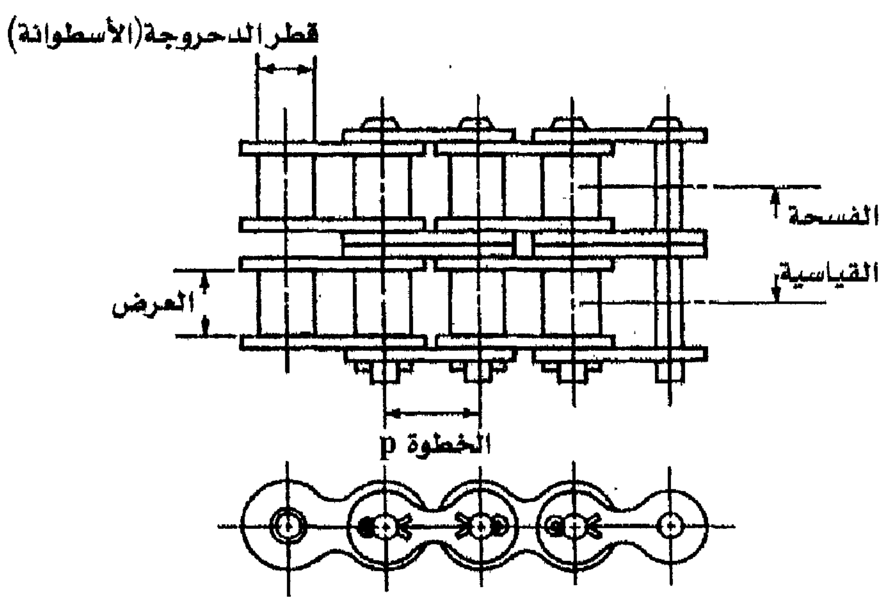
جدول(12- 7) الخطوات القياسية لسير التوقيت.

الخطوة P (in)	رمز الخدمة	نوع الخدمة
$\frac{1}{5}$	XL	خفيف جداً(Extra light)
$\frac{3}{8}$	L	خفيف(Light)
$\frac{1}{2}$	H	ثقيل(Heavy)
$\frac{7}{8}$	XH	ثقيل جداً(Extra heavy)
$1\frac{1}{4}$	XXH	(Double extra heavy) ثقيل جداً جداً

7.5: السلاسل الدحروجية(Roller chains):

من الميزات الأساسية للسلاسل هي نسبة السرعة الثابتة، حيث لا يحدث إنزلاق أو تزحف، عمر الخدمة الطويل، وقدرتها على إدارة عدد من الأعمدة من مصدر واحد للقدرة.

تمّ إنتاج السلاسل بشكل قياسي حسب ANSI(المعهد الوطني الأمريكي القياسي)(American National Standards Institute) شكل(9- 7).



شكل(9- 7) جزء من سلسلة مزدوجة قياسية

تعرّف خطوة السلسلة على أنها المسافة بين مركزي دحروجين، أمّا العرض فهو البعد بين الصفيحتين الداخليتين.

تصنع هذه السلاسل بشكل مفرد، مزدوج، ثلاثي أو رباعي، وتعطى الأبعاد القياسية لهذه السلاسل في جدول(13- 7).

جدول(13- 7) أبعاد السلاسل الدحروجية الأمريكية القياسية المفردة.

رقم السلسلة (ANSI)	الخطوة in (mm)	العرض in (mm)	اقل مقاومة شد Lb (N)	الوزن المتوسط Lb/ft (N/m)	قطر الدحروجة in (mm)	الفسحة القياسية in (mm)
25	0.250 (6.35)	0.125 (3.18)	780 (3 470)	0.09 (1.31)	1.130 (3.30)	0.252 (6.40)
35	0.375 (9.52)	0.188 (4.76)	1 760 (7 830)	0.21 (3.06)	0.200 (5.08)	0.399 (10.13)
41	0.500 (12.70)	0.25 (6.35)	1500 (6 670)	0.25 (3.65)	0.306 (7.77)	- -
40	0.500 (12.70)	0.312 (7.94)	3 130 (13 920)	0.42 (6.13)	0.312 (7.92)	0.566 (14.38)
50	0.625 (15.88)	0.375 (9.52)	4 880 (21 700)	0.69 (10.1)	0.400 (10.16)	0.713 (18.11)
60	0.75 (19.05)	0.500 (12.7)	7.030 (31 300)	1.00 (14.6)	0.469 (11.91)	0.897 (22.78)
80	1.000 (25.40)	0.625 (15.88)	12 500 (55 600)	1.71 (25.0)	0.625 (15.87)	1.153 (29.29)
100	1.250 (31.75)	0.750 (19.05)	19 500 (86 700)	2.58 (37.7)	0.75 (19.05)	1.409 (35.76)
120	1.500 (38.10)	1.000 (25.40)	28 000 (124 500)	3.87 (65.5)	0.875 (22.22)	1.789 (45.44)
140	1.75 (44.45)	1.000 (25.40)	38 000 (169 000)	4.95 (72.2)	1.000 (25.40)	1.924 (48.87)
160	2.000 (50.80)	1.250 (31.75)	50 000 (222 000)	6.61 (96.5)	1.125 (28.75)	2.305 (58.55)
180	2.250 (57.15)	1.406 (35.71)	63 000 (280 000)	9.06 (132.2)	1.406 (35.71)	2.592 (65.84)
200	2.500 63.50)(	1.500 (38.10)	78 000 (347 000)	10.96 (159.9)	1.562 (39.67)	2.817 (71.55)
240	3.00 (76.70)	1.875 (47.63)	112 000 (498 000)	16.4 (239)	1.875 (47.62)	3.458 (87.83)

يوضح شكل(10- 7) عجلة مسننة تقود سلسلة باتجاه عكس عقارب الساعة.

إذا رمزنا لخطوة السلسلة بالرمز P، زاوية الخطوة γ، قطر دائرة الخطوة للعجلة المسننة D، نستنتج من شكل(10- 7) العلاقة التالية:

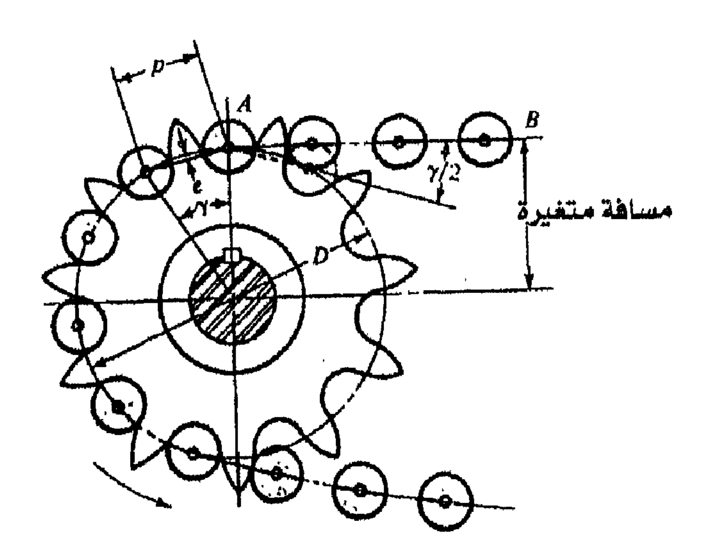
$$\sin\frac{\gamma}{2} = \frac{p/2}{D/2}$$

أو

$$D = \frac{P}{\sin\left(\gamma/2\right)}$$

وبما أنّ $\gamma = \frac{360^\circ}{N}$، حيث N عدد أسنان العجلة المسننة، يمكن صياغة المعادلة التالية:

$$D = \frac{P}{Sin(180^\circ / N)}$$



شكل(10- 7) تعشيق السلسلة مع العجلة المسننة

تسمى الزاوية $\frac{\gamma}{2}$ بزاوية المفصل أو زاوية الربط(Angle of articulation)، يمكن ملاحظة أنّ قيمة هذه الزاوية هي دالة من عدد الأسنان، إنّ دوران الوصلة ضمن هذه الزاوية يسبب الصدم بين الدحروجة وسن العجلة ويسبب البلى في مفصل السلسلة.

بما أنّ عمر السلسلة هو دالة من البلى ومقاومة التعب، من الضروري تقليل زاوية المفصل قدر الإمكان.

إنّ عدد أسنان العجلة يؤثر على نسبة السرعة خلال الدوران ضمن زاوية الخطوة γ، في وضعية السلسلة شكل (10- 7) حيث أنّ السلسلة AB تكون مماسية لدائرة الخطوة في العجلة، فعندما تدور العجلة زاوية مقدارها $\gamma/2$، فإنّ خط السلسلة AB يتحرّك بقرب مركز دوران السلسلة. هذا يعني أنّ خط السلسلة AB يتحرّك إلى أعلى وإلى أسفل.

تعرّف سرعة السلسلة V على أنها عدد الأقدام التي تغادر العجلة في وحدة الزمن. وبناءً على ذلك تعطى سرعة السلسلة بالعلاقة التالية:

$$V = \frac{NPn}{12}$$

حيث:

N: عدد أسنان العجلة(Sporcket).

P: خطوة السلسلة(in).

n: سرعة العجلة(rev/ min).

وتكون أقصى سرعة خروج للسلسلة من العجلة هي:

$$v_{max} = \frac{\pi D n}{12} = \frac{\pi n P}{12 \sin(\gamma_{/2})}$$

وتكون أقل سرعة خروج عند القطر d كما يلي:

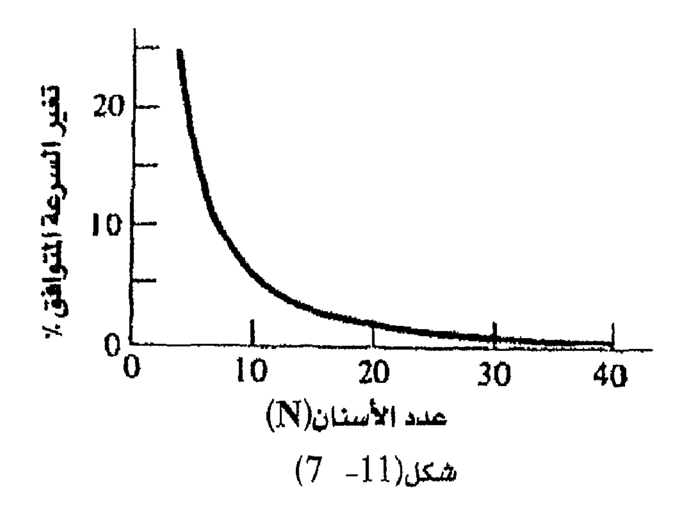
$$v_{min} = \frac{\pi d n}{12} = \frac{\pi n p \cos(\gamma / 2)}{12 \sin(\gamma / 2)}$$

d = D cos

وبتعويض قيمة $\frac{\gamma}{2} = \frac{180^\circ}{N}$ يمكن إيجاد تغيّر السرعة كما يلي:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{v_{max} v_{min}}{V} = \frac{\pi}{N}\left[\frac{1}{\sin(180^\circ / N)} - \frac{1}{\tan(180^\circ / N)}\right]$$

ويسمى بتغيّر السرعة المتوافق(Chordal speed Variation) كما هو في الشكل(11- 7).



شكل(11- 7)

من النادر أن تنهار السلاسل الدحروجية بسبب أحمال الشد، وإنما تنهار بسبب عدد ساعات الخدمة الطولية، بحيث يكون الإنهيار حقيقة ناتج عن بلى الأسطوانات الدحروجية أو التعب، يتم إعداد جداول من قبل المصنعين تشتمل على القدرة(بالحصان) والملائمة لعجلة(Sprocket) لها عدد معيّن من الأسنان، كما في جدول(14- 17) و(15- 17).

جدول(14- 7) القدرة(بالحصان) المحسوبة لسلسلة دحروجية أحادية الخطوة المناسبة لعجلة أسنانها 17 سن.

سرعة العجلة	رقم السلسلة حسب(ANSI)					
(rev/ min)	25	35	40	41	50	60
50	0.05	0.16	0.37	0.20	0.72	1.24
100	0.09	0.29	0.69	0.38	1.34	2.31
150	0.13	0.41*	0.99*	0.55*	1.92*	3.32
200	*0.16	0.54*	1.29	0.71	2.50	4.30
300	0.23	0.78	1.85	1.02	3.61	6.20
400	*0.30	1.01*	2.40	1.32	4.67	8.03
500	0.37	1.24	2.93	1.61	5.71	9.81
600	*0.44	1.46*	3.45*	1.90*	6.72*	11.6
700	0.50	1.68	3.97	2.18	7.73	13.3
800	0.56	1.89*	4.48*	2.46*	8.71*	15.0
900	0.62	2.10	4.98	2.74	9.69	16.7
1000	0.68*	2.31*	5.48	3.01	10.7	18.3
1200	0.81	2.73	6.45	3.29	12.6	21.6
1400	0.93*	3.13*	7.41	2.61	14.4	18.1
1600	1.05*	3.53*	8.36	2.14	12.8	14.8
1800	1.16	3.93	8.96	1.79	10.7	12.4
2000	1.27*	4.32*	7.72*	1.52*	9.23*	10.6
2500	1.56	5.28	5.51	1.10*	6.58*	7.57
3000	1.84	5.64	4.17	0.83	4.98	5.76

جدول(15- 7) القدرة(بالحصان المحسوبة لسلسلة دحروجية أحادية الخطوة المناسبة لعجلة عدد أسنانها 17 سن.

سرعة العجلة (rev/ min)	رقم السلسلة حسب(ANSI)							
	80	100	120	140	160	180	200	240
50	2.88	2.52	9.33	14.4	20.9	28.9	38.4	61.8
100	5.38	10.3	17.4	26.9	39.1	54.0	71.6	115
150	7.75	14.8	25.1	38.8	56.3	77.7	103	166
200	10.0	19.2	32.5	50.3	72.9	101	134	215
300	14.5	27.7	46.8	72.4	105	145	193	310
400	18.7	35.9	60.6	93.8	136	188	249	359
500	22.9	43.9	74.1	115.	166	204	222	0
600	27.0	51.7	87.3	127	141	155	169	
700	31.0	59.4	89.0	101	112	123	0	
800	35.0	63.0	72.8	82.4	91.7	101		
900	39.3	52.8	61.0	69.1	76.8	84.4		
1000	37.7	45.0	52.1	59.0	65.6	72.1		
1200	28.7	34.3	39.6	44.9	49.9	0		
1400	22.7	27.2	31.5	35.6	0			
1600	18.6	22.3	25.8	0				
1800	15.6	18.7	21.6					
2000	13.3	15.9	0					
2500	9.56	0.40						
3000	7.25	0						

تعتبر خواص الحمل مهمة جداً في اختيار السلسلة الدحروجية.

وبشكل عام نحتاج إلى سعة سلسلة إضافية في الحالات التالية:

- عجلة صغيرة عدد أسنانها أقل من 9 أسنان للسرعات المنخفضة أو عدد أسنان أقل من 16 سن للسرعات العالية.
- العجلات الكبيرة.

- حدوث أحمال صدمية، أو حدوث إنعكاس متكرر في الحمل.
- وجود ثلاث عجلات أو أكثر في نظام القيادة.
- تزييت أو تشحيم سيء(معدوم).
- تشغيل السلسلة في ظروف مغبّرة كثيرة الأوساخ.

وللحصول على سلسلة قياسية ملائمة لهذه الظروف، ثمّ تعديل الحسابات باستخدام عاملين تصحيح وهما:

1. عامل تصحيح السن k_1 والذي يحل مشكلة وجود عجلة بعدد أسنان أكبر أو أقل من 17 سن، كما في جدول(16- 17).

جدول(16- 17) عوامل تصحيح السن.

عامل تصحيح السن K_1	عدد أسنان العجلة القائدة	عامل تصحيح السن K_1	عدد أسنان العجلة القائدة
1.29	22	0.53	11
1.35	23	0.62	12
1.41	24	0.70	13
1.46	25	0.78	14
1.73	30	0.85	15
1.95	35	0.92	16
2.15	40	1.00	17
2.37	45	1.05	18
2.51	50	1.11	19
2.66	55	1.18	20
2.80	60	1.26	21

2. عامل تعدد الجدلة(الطبقة)(strand–multiple) K_2، والذي يحل مشكلة وجود عدد من الجدلات(الطبقات) في السلسلة.

وبناءً على ذلك يمكن إيجاد قيمة القدرة المصححة كما يلي:

$_r = K_1 \, K_2 \, H_r H'$

حيث:

r: القدرة المصححة كلياً(بالحصان).

H_r: القدرة المقدرة(بالحصان).

جدول(17- 7) عوامل تعدد الطبقة K_2

عدد الطبقات	K_2
1	1.0
2	1.7
3	2.5
4	3.3

ويمكن استخدام عامل الخدمة K_2 من جدول(11- 7) وذلك لحساب القدرة التصميمية.

يمكن إيجاد طول السلسلة من خلال عدد الخطوات، ومن المفضل الحصول على عدد خطوات مزدوجة، ويعطى طول السلسلة من خلال العلاقة التالية:

$$\frac{L}{P} = \frac{2C}{P} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 (C/P)}$$

حيث:

L: طول السلسلة.

P: خطوة السلسلة.

C: المسافة المركزية.

N_1: عدد أسنان العجلة الصغيرة.

N_2: عدد أسنان العجلة الكبيرة.

من الواجب تزييت السلاسل بانتظام للحصول على عمرٍ أطول، حيث يمكن استخدام زيت معدني خفيف أو متوسط بدون مواد إضافية.

لا ينصح باستخدام الزيوت الثقيلة والشحوم لأنها تقوم بإغلاق الخلوصات بين أجزاء السلسلة.

مثال(3): محرّك كهربائي قدرته $7\frac{1}{2}hp$ ويدور بسرعة 300rpm يقود ناقل بسرعة 200rpm، إذا علمت أنّ المسافة المركزية التقريبية 28in، صمم سلسلة القيادة المناسبة، أعتبر أن الحمل من نوع الصدم المتوسط، وأن عدد أسنان العجلة الصغيرة 20 سن، وأنّ السلسلة ذات ثلاث طبقات ورقمها50.

الحل:

من جدول(11- 7) نجد عامل الخدمة $k_s = 1.3$، وعليه تكون القدرة التصميمية كما يلي:

$$H = 1.3(7.5) = 9.75hp$$

بما أنّ عدد أسنان العجلة 20 سن من جدول(16- 7) و(17- 7) نجد العوامل التالية:

$$K_1 = 1.18$$

$$K_2 = 2.5$$

ومن جدول(14- 7) نختار القدرة المقابلة لسلسلة رقمها 50 عند سرعة .300rpm

$H_r = 3.61$

ثمّ نجد القدرة المصححة كما يلي:

$3.61 = 10.65\ hp \times 2.5 \times H'_r = K_1\ K_2\ H_r = 1.18$

ومن جدول(13- 7) تختار عرض السلسلة وخطوتها وقطر الدحروجة:

الخطوة = $P = 0.625$ in

العرض = $W = 0.375$ in

قطر الدحروجة = $d = 0.4$ in

ثمّ نجد عدد أسنان العجلة الكبيرة:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \quad \frac{20}{N_2} = \frac{200}{300} \Rightarrow N_2 = \frac{20 \times 300}{200} = 30_{\text{سن}}$$

ثمّ نجد طول السلسلة ثلاثية الطبقة(triple strand) كما يلي

$$\frac{L}{P} = \frac{2C}{P} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 (C/P)}$$

$$= \quad \frac{2(28)}{0.625} + \frac{20+30}{2} + \frac{(30-20)^2}{4\pi^2 (28/0.625)}$$

= 114.7 Pitches

يكون أقرب عدد زوجي لعدد خطوات هذه السلسلة هو 114 خطوة.

$0.625 = 71.25 \text{ in} \times P = 114 \times L = 114$

∴ يكون طول السلسلة هو 71.25 in

مثال(4): محرّك كهربائي قدرته 10hp يدور بسرعة 400rpm ويقود ناقل بسرعة 300rpm، إذا علمت انّ المسافة المركزية التقريبية هي 34 in، إعتبر أنّ الحمل من نوع الصدم الخفيف، وانّ عدد أسنان العجلة الصغيرة 30 سن، وأنّ السلسلة ذات طبقتين ورقمها 50، صمم سلسلة القيادة المناسبة.

الحل:

من جدول(11- 7) نجد عامل الخدمة $K_s= 1.2$ ومن ثمّ نجد القدرة التصميمية كما يلي:

$10 = 12\text{hp} \times H - 1.2$

بما أنّ عدد أسنان العجلة الصغيرة 30 سن من جدول(16- 7) و(17- 7) العوامل التالية:

$K_1= 1.73$

$K_2= 1.7$

من جدول(14- 7) نختار القدرة المقابلة لسلسلة رقمها 50 عند سرعة 400rpm.

$H_r = 4.67$

نجد القدرة المصححة كما يلي:

$$H'_r = (1.73)(1.7)(4.67) = 13.73 \text{ hp}$$

من جدول(13- 7) نختار عرض السلسلة وخطوتها وقطر الدحروجة:

الخطوة P= 0.625 in

عرض السلسلة W = 0.375in

قطر الدحروجة d = 0.4 in

ثم نجد عدد أسنان العجلة الكبيرة كما يلي:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \frac{30}{N_2} = \frac{300}{400}$$

$$\Rightarrow N_2 = \frac{30 \times 400}{300}$$

= 40 سن

والآن نجد طول السلسلة ثنائية الطبقة(double strand) كما يلي:

$$\frac{L}{P} = \frac{2C}{P} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 (C/P)}$$

$$= \frac{2(34)}{0.625} + \frac{30 + 40}{2} + \frac{(40 - 30)^2}{4\pi^2 (34/0.625)}$$

$= 143.85$ Pitches(خطوة)

ويكون أقرب عدد زوجي لعدد خطوات هذه السلسلة هو 144 خطوة.

أي أنّ طول السلسلة هو 144 خطوة.

$$\therefore L = 144 \times 0.625 = 90in$$

الأسئلة:

1) سير مسطح عرضه 6 in وسمكه $\frac{9}{32}in$ وينقل قدرة مقدارها 15hp.

إذا علمت أن محوري البكرتين متوازيان في مستوى أفقي، ويبعدان عن بعضهما مسافة 8ft، قطر البكرة القائدة 6in، وتدور بسرعة مقدارها 1750rev/min بشكل يكون فيه الجزء المترخي من السير في الأعلى، وقطر البكرة المنقادة 18 in، ووزن مادة السير(الكثافة) $0.035\ lb/in^3$.

أ. أوجد مقدار الشد في الجزء المشدود والمرتخي من السير إذا علمت أنّ معامل الاحتكاك هو 0.3.

ب. ما مقدار الشد في الجزئين في السير في حالة كون معامل الاحتكاك 0.2 وهل ينزلق السير أم لا؟

ج. أوجد طول السير.

2) سير ذو قلب من النايلون، عرضه 200mm، وينقل قدرة مقدارها 60kw عندما يتحرك بسرعة 25m/s، إذا علمت أنّ كتلة السير لكل متر هي 2kg/m، وتم استخدام السير في نظام متقاطع ليتصل مع بكرة قائدة قطرها 300mm، وبكرة منقادة قطرها 900mm، ومسافة بين المركزين مقدارها 6m.

أ. أوجد طول السير وزاوية الإحاطة.

ب. أوجد الشد في جزئي السير المرتخي والمشدود بناءً على معامل احتكاك قدره 0.38.

3) سير مسطح في نظام قيادة مكون من بكرتين قطر كل منهما 4in والمسافة المركزية بينهما 6ft، حدد نوع السير وحجمه اللازم لنقل قدرة مقدارها 60hp عندما تكون سرعة البكرة 380 rev/min، استخدم عامل خدمة $k_s = 1.1$.

4) سير مسطح نوع A -3 مصنوع من البوليمايد عرضه 10in يتصل مع بكرة قائدة قطرها 16in وبكرة منقادة قطرها 36in في نظام مفتوح، إذا علمت أنّ

المسافة المركزية هي 15ft، وأنّ سرعة السير هي 3600 ft/min، أوجد أكبر قدرة يمكن نقلها بواسطة السير، أعتبر أنّ $k_s = 1.3$، أوجد كذلك قيم الشد في السير.

5) محرّك قدرته 5hp يتصل مع سير شكل V إذا علمت أنّ هذا السير ينقل 60% من هذه القدرة، وأنّ قطر البكرة القائدة هو 6.2 in، وقطر البكرة القائدة هو 6.2in، وقطر البكرة المنقادة هي 12in، يجب اختيار سير بحيث يكون طول خطوته أقرب ما يكون إلى 92in وأنّ سرعة المحرّك لا تزيد عن 3100rev/min، وأنّ زاوية التلامس هي 180° الكلا البكرتين، صمم السير المناسب.

6) تمّ استخدام سيرين V من نوع B85 لقيادة بكرة قائدة قطرها 5.4in وتدور بسرعة 1200rev/min، وبكرة منقادة قطرها 16 in، أوجد قدرة هذا السير مستخدماً عامل خدمة قدرة 1.25، وأوجد كذلك المسافة بين المركزين.

7) سلسلة ذات أربع طبقات رقمها 40، تنقل قدرة من عجلة عدد أسنانها 21 سن والتي تدور بسرعة 1200rev/min، إذا عملت أنّ نسبة السرعة هي 1 :4.

أ. أوجد القدرة المقدّرة لهذا النظام.

ب. ما هو مقدار الشد في السلسلة.

ج. ما هو عامل الأمان المستخدم للسلسلة بناءً على أقل مقاومة شد.

د. ما هو طول السلسلة إذا علمت أنّ المسافة بين المركزين هي 20in.

8) أوجد القدرة المقدرة(سلسلة ثنائية الطبقة رقمها 60، تستخدم لنقل قدرة بين عجلة قائدة عدد أسنانها 13 سن وعجلة منقادة عدد أسنانها 25سن.

أ. (المخمّنة) لهذا النظام.

ب. أوجد المسافة المركزية التقريبية إذا علمت أنّ طول السلسلة هي 82 خطوة.

المراجع

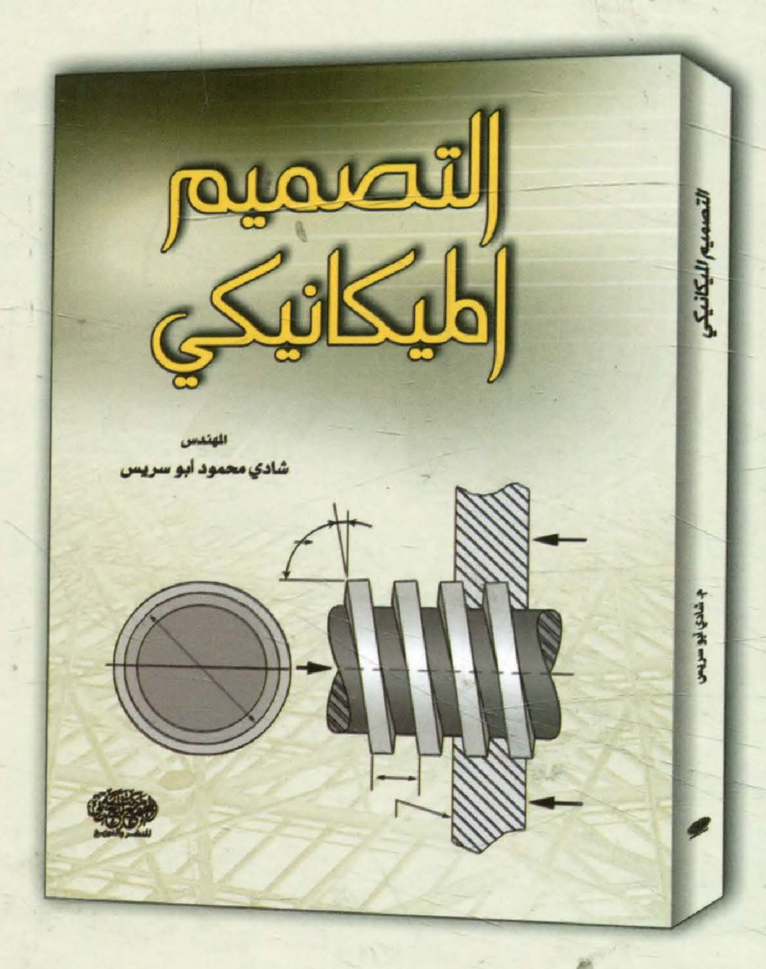
1. Mechanical Engineering Design; Joseph Edward Shigley. Charles R. Mischke, Fifth Edition.

2. Mechanics of Materials; R. C. Hibbeler, Fourth Edition.

3. مقاومة وإختبار المواد المعدنية، د. حسام محمد غانم، كلية الهندسة، جامعة الإسكندرية وبيروت العربية.

4. الهندسة الميكانيكية، د. باسل جميل ستراك.





مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

الأردن-عمان-وسط البلد- ش. السلط - مجمع الفحيص التجاري- تلفاكس : 2739 463 6 962+
خلوي:5651920 79 962+ ص.ب 8244 الرمز البريدي 11121 جبل الحسين الشرقي

الأردن - عمان - الجامعة الأردنية - ش. الملكة رانيا العبدالله - مقابل كلية الزراعة - مجمع زهدي حصوة التجاري

www.muj-arabi-pub.com
E-mail:Moj_ pub@hotmail.com